



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

INGENIERÍA INDUSTRIAL; TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN LECHO FLUIDO

AUTOR: ÁNGEL PRIETO PADILLA
TUTORA: CELIA SOBRINO FERNÁNDEZ



ÍNDICE

NOTACIÓN	5
FICHA TECNICA DEL ESTUDIO	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO	11
1.2. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO	11
1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO	12
2. FLUIDIZACION: PRINCIPIOS Y APLICACIONES	13
2.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO	14
2.2. COMPORTAMIENTO DE UN LECHO FLUIDO	19
2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS LECHOS FLUIDOS	20
2.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS LECHOS FLUIDOS	22
2.4.1. OPERACIONES FÍSICAS	22
2.4.1.1. Intercambio de calor	22
2.4.1.2. Recubrimiento de metales	23
2.4.1.3. Secado de sólidos	23
2.4.1.4. Recubrimiento de objetos y crecimiento de partículas	25
2.4.1.5. Adsorción	26
2.4.2. REACCIONES DE SÍNTESIS	27
2.4.3. CRAQUEO DE HIDROCARBUROS	28
2.4.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)	28
2.4.4. COMBUSTIÓN E INCINERACIÓN	30
2.4.4.1. Combustión de carbón en lecho fluido	30
2.4.4.2. Incineración de residuos sólidos	31
2.4.5. CARBONIZACIÓN Y GASIFICACIÓN	32
2.4.5.1. Gasificación de carbón	32
2.4.5.2. Gasificación de residuos sólidos	33
2.4.5.3. Activación de carbón	34
2.4.6. CALCINACIÓN	35
2.4.7. REACCIONES CON SÓLIDOS	36
2.4.8. BIOFLUIDIZACIÓN	37
3. CONCEPTOS TEÓRICOS DE FLUIDIZACION	39
3.1. PERDIDA DE CARGA	40
3.2. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACION	45



4. BURBUJAS EN LECHOS FLUIDOS	47
4.1. FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DE BURBUJAS	48
4.2. PARÁMETROS DE LAS BURBUJAS	49
4.3. MODELO DE DAVIDSON	50
5. CARACTERIZACION DE PARTICULAS	53
5.1. PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN	54
5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN	55
6. METODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN	58
6.1. PÉRDIDA DE CARGA EN EL LECHO	59
6.2. VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACIÓN UTILIZANDO LA MEDIDA DE FLUCTUACIONES DE PRESION	60
6.3. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO	63
7. INSTALACIÓN	65
7.1. DESCRIPCIÓN DEL LECHO	67
7.2. CARACTERISTICAS DEL GAS Y PARTÍCULAS DE FLUIDIZACION	69
7.3. SISTEMA DE MEDIDA Y ADQUISICIÓN DE DATOS	71
7.3.1. Sondas de presión	71
7.3.2. Transductores	71
7.3.3. Tarjeta de adquisición de datos	74
7.3.4. Programación	75
7.3.5. Configuración de la instalación	79
8. TOMA DE MEDIDAS Y CÁLCULOS	81
8.1. MEDIDAS DE PRESIÓN EN LA PARED DEL LECHO	82
8.2. MEDIDAS DE PRESION RADIAL	83
8.3. MEDIDAS DE PRESIÓN DIFERENCIAL	84
8.3. PROCESO DE MEDIDA	85
8.4. APLICACIÓN MÉTODO TEÓRICO	86
8.5. APLICACIÓN DE LOS METODOS EXPERIMENTALES	86
8.5.1. Tratamiento método pérdida de carga en el lecho	88
8.5.2. Tratamiento método de la desviación típica	89
9. RESULTADOS	90
9.1. PERDIDA DE CARGA EN EL DISTRIBUIDOR	91
9.2. PÉRDIDA DE CARGA EN EL LECHO	93
9.3. VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION	94
9.4. PRESION DIFERENCIAL, MODELO DE DAVIDSON	98
9.4.1. Slugging	101
9.5. PRESION RADIAL EN EL LECHO	103
9.6. FRECUENCIA CARACTERISTICA DEL LECHO	103



10.CONCLUSIONES Y MEJORAS FUTURAS	105
11.BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS	111
ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS SENSORES Y TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	115
ANEXO 3: PROGRAMAS	125
ANEXO 4: PLANOS ESTRUCTURALES DE LA INSTALACIÓN	132



NOTACIÓN

A	Sección transversal del lecho
A_m	Área de paso del flujo a través del lecho
a	Superficie por unidad de volumen del paquete de partículas del lecho
a_z	Parámetro función de transducción de los transductores
b_z	Parámetro función de transducción de los transductores
C_f	Coefficiente de fricción del flujo
D	Diámetro del lecho
d	Diámetro de una esfera
d_b	Diámetro de una burbuja
d_{b0}	Diámetro de una burbuja al salir del distribuidor
d_H	Diámetro hidráulico del paso del flujo
d_p	Diámetro de las partículas
Δp	Perdida de carga en el lecho
Δp_d	Perdida de carga en el distribuidor
\overline{E}	Energía media del movimiento vibratorio de las partículas
ε_0	Fracción de vacío en el lecho
ε_{mf}	Fracción de vacío para U_{mf}
k_1	Parámetro del movimiento dependiente de las propiedades de las partículas y la temperatura de operación
k_2	Parámetro del movimiento de las partículas dependiente de las condiciones de operación
L	Altura del lecho
l	Perímetro del paso del flujo en el lecho
l_{or}	Distancia entre centros de los orificios del distribuidor



λ	Inclinación del flujo respecto a la vertical del lecho
m_b	Masa del total de partículas contenidas en el lecho
m_p	Masa de una partícula
μ	Viscosidad del aire
N	Nº de esferas que componen el paquete de un lecho determinado.
Nr	Nº orificios del distribuidor
P_{med}	Presión media en una sección del lecho
P_{plenum}	Presión media en el plenum
r_b	Radio de la burbuja
Re	Nº de Reynolds del flujo en un tubo
Re'	Nº de Reynolds del flujo en un lecho de esferas
Re_{mf}	Reynolds para U_{mf}
R_n	Radio de curvatura de una burbuja
ρ	Densidad del aire
ρ_b	Densidad aparente del lecho de partículas
ρ_s	Densidad del material de las partículas
s	Espacio entre tomas de presión
σ_v	Desviación típica de las fluctuaciones de tensión proporcionadas por los transductores
σ_p	Desviación típica de las fluctuaciones de presión.
τ_0	Esfuerzo tangencial en la pared del lecho
U	Velocidad superficial del gas
u_{br}	Velocidad de ascenso de una burbuja
u_m	Velocidad media del gas en el paso por el lecho



U_{mb}	Velocidad de mínimo burbujeo
U_{mf}	Velocidad de mínima fluidización
\bar{V}	Tensión media emitida por los transductores de presión
V_{ap}	Volumen aparente de un lecho de partículas
V_h	Volumen hidrodinámico de una partícula
V_i	Tensión emitida por los transductores de presión
W	Energía del movimiento vibratorio de las partículas debido a heterogeneidades
z	Distancia al distribuidor desde cualquier punto del lecho



FICHA TÉCNICA DEL ESTUDIO

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE UN LECHO FLUIDO A PEQUEÑA ESCALA	
TIPO SISTEMA	Gas-sólido
GAS	Aire
SÓLIDOS	Arena de sílice (grupo B)
Tª TRABAJO	Atmosférica
P TRABAJO	Atmosférica
PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS	
ρ_s	2651 g/cm ³
d_p	733 μ m
ε_0	0.402
PROPIEDADES DEL AIRE	
ρ	1.204kg/m ³
μ	1.8·10 ⁻⁵ kg/s
CARACTERÍSTICAS DEL LECHO	
D	0.15m
L/D	1.5
EQUIPO DE MEDIDA	
MEDIDAS	Transductores de presión piezoelectricos
ADQUISICIÓN DE LAS MEDIDAS	PC con tarjeta adquisición datos
SOFTWARE	DASYLAB

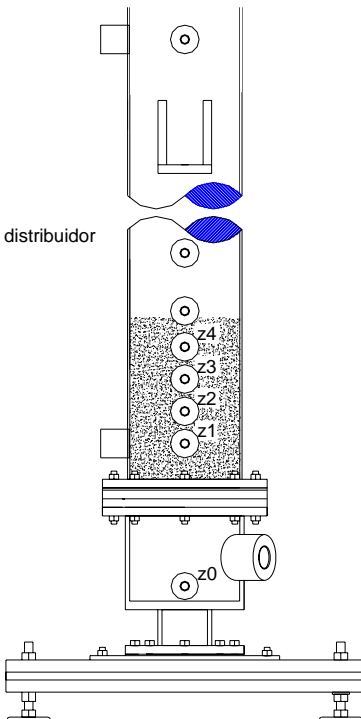
Distancia al distribuidor

z1=0.062m

z2=0.107m

z3=0.152m

z4=0.197m



DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO
En el estudio realizado se han obtenido los parámetros característicos del lecho objeto del mismo. Tras la adquisición de los conocimientos necesarios se aplicaran estos para obtener la velocidad mínima de fluidización, la pérdida de carga en el lecho, y su frecuencia característica. Por último se incluye un estudio sobre la diferencia entre medidas de presión absolutas y diferenciales.

PARÁMETROS DEL LECHO	
PERDIDA DE CARGA EN EL DISTRIBUIDOR PARA U_{mf}	315 Pa
PERDIDA DE CARAG EN EL LECHO	3500 Pa
VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN TEÓRICA	0.381m/s
VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN EXPERIMENTAL ($\Delta p-U$)	0.43m/s
VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN EXPERIMENTAL (σ_p-U)	0.4m/s
APARICIÓN DE SLUGGING	U>0.95m/s
FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO	2.25Hz (800l/min)

1. INTRODUCCIÓN.



Muchos han sido los estudios y aplicaciones realizadas acerca el fenómeno de la fluidización de partículas sólidas desde el primer cuarto del siglo pasado. Para establecer una primera toma de contacto con el fenómeno, podemos definir éste en términos de un simple experimento en el que un lecho de partículas sólidas es mantenido en suspensión por una corriente de gas o líquido que pasa a través de ellas.

El comportamiento de dichas partículas guarda ciertas similitudes con el comportamiento de un fluido, de ahí la denominación de “Lecho Fluidizado”. El interés despertado por las buenas propiedades de los lechos fluidos para determinados procesos industriales, a llevado a numerosos investigadores a desarrollar estudios, técnicas de caracterización y desarrollo de aplicaciones. La gran dificultad que entraña la caracterización y el conocimiento de lo que ocurre en el interior del lecho fluidizado hace que existan diversos estudios que finalizan en diferentes correlaciones, técnicas y conclusiones.

A lo largo del presente proyecto se tratará el fenómeno de la fluidización desde el punto de vista experimental, aunque también se dedicará una parte del mismo a ofrecer una visión teórica aplicando conocimientos de ingeniería de fluidos.

Para elaborar la caracterización de un lecho fluido, se han desarrollaron métodos experimentales basados en el estudio de la pérdida de carga en el lecho, las fluctuaciones de presión y la fracción de vacío o la velocidad de ascenso. En nuestro proyecto hemos utilizados principalmente tres métodos de estudio diferentes:

- Método teórico: Obtendremos la pérdida de carga en el lecho así como la velocidad mínima de fluidización aplicando ingeniería de fluidos y correlaciones basadas en métodos experimentales.
- Pérdida de carga en el lecho: Es el método más utilizado ya que es sencillo de aplicar y aporta resultados fiables. En él consideramos que el lecho fluido se comporta como un líquido desde el punto de vista hidrostático y tomamos medidas de pérdida de carga en el mismo.
- Fluctuaciones de presión: Éste método es posterior al de la pérdida de carga. Su aplicación también es sencilla y podemos caracterizar el comportamiento el lecho fluido utilizando herramientas lineales en el dominio del tiempo. Mediante la desviación típica de las fluctuaciones de presión obtendremos la velocidad mínima de fluidización.

Además existen otros estudios y experimentos para caracterizar el comportamiento de un lecho fluido así como los fenómenos locales que ocurren en el mismo. Algunos de estos métodos consisten en medir la velocidad de ascenso de las burbujas, la fracción de vacío, utilización de sensores ópticos para medir el paso de burbujas, láser, o tratamiento digital de imágenes.



1.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO.

El objetivo del presente proyecto es la caracterización hidrodinámica experimental de un lecho fluido tipo gas-sólido. Para ello se analizará el comportamiento hidrodinámico del lecho a través de diferentes tipos de análisis basados en la obtención de la velocidad de mínima fluidización. La velocidad de mínima fluidización corresponde con la velocidad superficial del gas necesaria para mantener las partículas en suspensión en un sistema determinado.

La velocidad de mínima fluidización juega un papel importante en el comportamiento del lecho ya que es necesario un determinado caudal de gas o líquido para lograr la fluidización del mismo. Además según la aplicación, las características del lecho varían y por lo tanto ésta velocidad puede cambiar, haciendo que la velocidad de mínima fluidización sea un parámetro que debemos tener controlado en nuestra instalación.

Por último trataremos un aspecto muy importante en la toma de medidas e instrumentación del lecho, que es la diferencia entre tomar medidas de presión absoluta y diferencial para determinar cual es la más conveniente y las ventajas que aporta una respecto a la otra. En la actualidad existen aún discrepancias en cuanto a que tipo de medidas es preferible emplear, por lo tanto intentaremos obtener conclusiones sencillas y prácticas de nuestra experiencia en el desarrollo del proyecto.

1.2. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO.

La fluidización de partículas como medio físico para su uso en procesos industriales hace que cobre especial importancia su estudio.

En 1926 Winkler desarrolló un gasificador de carbón comercial a gran escala, el cual empleaba el fenómeno de la fluidización para su funcionamiento. Podríamos decir que desde entonces la fluidización ha sido ampliamente estudiada y aplicada aunque no siempre obteniendo los resultados esperados. Tanto es así que en la actualidad existe una cierta incertidumbre y disparidad de resultados y teorías sobre algunos aspectos de la fluidización así como lo que rodea a la misma. Muchos han sido los investigadores que han dedicado su trabajo a la caracterización del proceso y su aplicación industrial, ofreciéndonos hoy en día el conocimiento acerca de fluidización que podemos utilizar para su desarrollo industrial.

Actualmente la necesidad de realizar amplios proyectos de investigación para el desarrollo de aplicaciones industriales en las que la fluidización supone una gran ventaja hace necesario la adquisición de conocimiento sobre el tema.



1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO.

El proyecto abarca desde la construcción del lecho objeto del estudio, incluyendo la instrumentación del mismo, hasta el estudio experimental posterior para su caracterización. El proyecto lo podemos dividir en tres fases diferentes:

1. Introducción y adquisición de conocimientos teóricos del fenómeno de la fluidización así como de las técnicas de medida y caracterización de lechos utilizadas.
2. Construcción de una instalación para el laboratorio que consta de un lecho fluido a pequeña escala donde se pueden tomar medidas para caracterizarlo. La instalación debe estar equipada con sistemas de toma de medidas y control ya que tomaremos medidas de presión para la caracterización del mismo. Para ello necesitaremos un equipo apropiado para instrumentar el lecho y ser capaces de medir series temporales a alta frecuencia y almacenarlos.
3. Caracterización del lecho a través de medidas de fluctuación de presión en el mismo. A partir de los datos almacenados, se procederá al tratamiento de los mismos para determinar los parámetros característicos del lecho.

2. FLUIDIZACION: PRINCIPIOS Y APLICACIONES.



En el presente capítulo se ofrece una visión global y sencilla sobre el fenómeno de la fluidización atendiendo al conocimiento y la caracterización de lo que ocurren en el interior de un lecho fluido. Así mismo también se ofrecerá una visión teórica del cálculo de la caída de presión y de la velocidad de mínima fluidización, para comprender la dificultad que entraña su estudio teórico aplicando conocimientos sobre ingeniería de fluidos. Por otra parte, se presenta la fluidización como aplicación industrial dando una visión de las ventajas e inconvenientes y describiendo algunas de sus aplicaciones.

La historia de la fluidización es bastante turbulenta. Aunque su primer uso comercial data de 1926, golpeó la escena industrial en 1942 con su utilización en el proceso de craqueo catalítico. Desde entonces muchos han sido los esfuerzos de investigación que han desembocado en numerosas teorías y experimentos en los que podemos apoyarnos, pero también han existido muchos fracasos. Lamentablemente existe todavía mucha confusión y contradicción entre los resultados y conclusiones de los diferentes investigadores que han realizado trabajos al respecto, dejando un debate abierto en la obtención de conocimientos y teorías sobre muchos aspectos de la fluidización. Por otra parte cabe destacar que la mayoría de los experimentos han sido realizados en lechos a pequeña escala, lo que ha supuesto otra incógnita ya que cuando se han extrapolado los resultados para la construcción de instalaciones de tamaño real éstos han variado significativamente suponiendo un paso atrás en el diseño. Por lo tanto es muy importante desarrollar minuciosamente una instalación conociendo profundamente el fenómeno de la fluidización.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO.

La fluidización es el fenómeno por el cual se consigue que un lecho de partículas sólidas se suspenda en el seno de un gas o líquido al hacerlo pasar entre ellas, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido.

Las características del flujo que pasa a través de las partículas sólidas del lecho serán determinantes para controlar el comportamiento del mismo y distinguir diferentes regímenes de funcionamiento.

Para explicarlo de una manera sencilla, de aquí en adelante imaginemos que tenemos un lecho de partículas sólidas dentro de un cilindro vertical e inyectamos aire a una cierta velocidad por la parte inferior del mismo.

Si el fluido en movimiento asciende a baja velocidad, en principio éste se filtra a través de los espacios entre las partículas, que permanecen estacionarias; este estado se denomina de “lecho fijo” (Figura 2.1(a)). Con un incremento en la velocidad del fluido, las partículas se mueven de forma independiente por medio de pequeñas vibraciones.

Si seguimos aumentando la velocidad, se alcanza un punto donde todas las partículas se encuentran suspendidas por el flujo ascendente de gas o líquido. En este punto la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas se equilibra con el peso de éstas, desapareciendo entonces la componente vertical de la fuerza de compresión entre



partículas adyacentes. De este modo, la pérdida de carga a través de un volumen determinado del lecho es igual al peso de las partículas existentes por unidad de área. Este estado se denomina “lecho en comienzo de fluidización”, aunque si hacemos una traducción literal de la bibliografía lo podemos denominar “fluidización incipiente” o “lecho en mínima fluidización” (Figura 2.1(b)). Este punto marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente fluidizado, y la velocidad superficial del fluido se denomina velocidad de mínima fluidización, U_{mf} .

Un incremento de la velocidad por encima de la de mínima fluidización provoca un comportamiento diferente en el lecho dependiendo del sistema: líquido-sólido o gas-sólido. En el primer tipo de sistema un incremento en la velocidad por encima de la de mínima fluidización, normalmente da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho, las posibles inestabilidades provocadas por un flujo irregular se amortiguan y en condiciones normales no se observan heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Un lecho con estas características se denomina de “fluidización particulada”, “no burbujeante” u “homogénea” (Figura 2.1(c)). Sin embargo, en sistemas gas-sólido, éste tipo de fluidización sólo tiene lugar en ciertos casos de partículas muy ligeras con gas denso a alta presión. Generalmente el comportamiento de los sistemas fluidizados por gas es bastante diferente; si incrementamos la velocidad del gas por encima de la correspondiente a la mínima fluidización se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. A mayores velocidades, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más vigoroso, y el lecho no se expande mucho más de su volumen de mínima fluidización. Este comportamiento se denomina “fluidización agregativa”, “burbujeante”, o “heterogénea” (Figura 2.1(d)). En raros casos se puede reproducir este comportamiento en sistemas líquido-sólido, ocurriendo sólo si para su fluidización se emplean sólidos muy densos y líquidos de baja densidad.

Otro fenómeno que ocurre en sistemas gas-sólido es la aparición de burbujas de gas que se mueven ascendentemente entre las partículas. Las burbujas de gas al ascender por el lecho crecen y se produce la coalescencia de las mismas. En ocasiones, en lechos de gran longitud y pequeño diámetro las burbujas pueden llegar a ser tan grandes como el diámetro de la columna que contiene el lecho. Este fenómeno se conoce como *slugging*, y las burbujas producidas se denominan *slugs*. Si utilizamos partículas finas, éstas caen suavemente hacia abajo rodeando las burbujas, lo que da lugar a burbujas de mayor tamaño. El fenómeno se conoce con el nombre de *slugging* con *slugs* axiales (Figura 2.1(e)). Para partículas más grandes, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada hacia arriba con un movimiento semejante al de un pistón. Las partículas caen desde el *slug* cuando éste se desintegra al llegar a la superficie. A partir de dicho instante aparece un nuevo *slug* repitiéndose continuamente este movimiento inestable. Éste comportamiento se denomina *slugging* con *slugs* de pared (Figura 2.1(f)).

El *slugging* se debe tener especialmente en cuenta en el diseño de lechos fluidizados largos y estrechos.

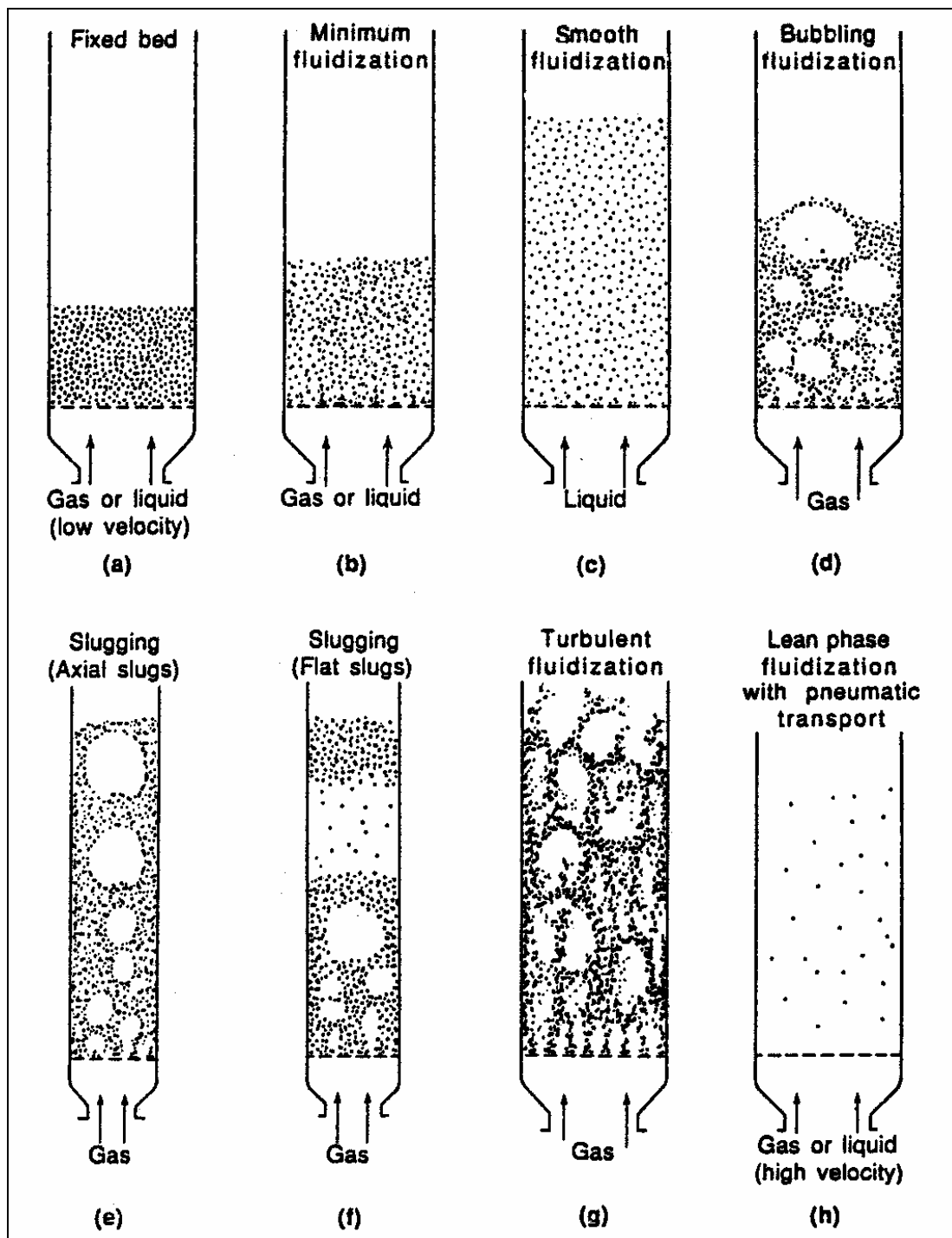


Figura 2.1. Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido: (a) Lecho fijo; (b) Lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante; (d) Lecho con fluidización burbujeante; (e) Slugging con slugs axiales; (f) Slugging con slugs de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas.[1]

Cuando en sistemas gas-sólido aumentamos la velocidad del gas considerablemente podemos llegar a superar el valor de la velocidad terminal de los sólidos, produciéndose el arrastre de partículas desapareciendo la superficie superior del lecho. En este régimen se observa un movimiento turbulento de sólidos y burbujas de gas de diversos tamaños y formas. Este estado se denomina “lecho fluidizado turbulento” (Figura 2.1(g)). Con un aumento en la velocidad del gas aún mayor, las partículas son transportadas por el mismo expulsándolas fuera el lecho. En este estado se tiene un “lecho fluidizado disperso”, “diluido”, o “en fase dispersa”, con transporte neumático de sólidos (Figura 2.1(h)). El término fluidización hace referencia tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, así como a sistemas de transporte neumático.

Tanto en la fluidización turbulenta como en la de fase dispersa se pueden arrastrar grandes cantidades de partículas que es necesario recuperar y devolver al lecho. En los lechos en los que se utiliza estos regímenes se emplean sistemas que devuelven las partículas arrastradas al interior con la ayuda de ciclones. Los ciclones son elementos de sedimentación por fuerza centrífuga. En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos (Figura 2.2(a)). En los lechos fluidizados de fase dispersa, donde el arrastre de partículas es mayor, normalmente se emplean grandes ciclones fuera del lecho (Figura 2.2(b)). En general, en los lechos fluidizados circulantes es necesario para el correcto desarrollo de las operaciones que la recirculación de las partículas a través de los elementos de retención sea suave y uniforme. Los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas se conocen con el nombre de lechos fluidizados circulantes.

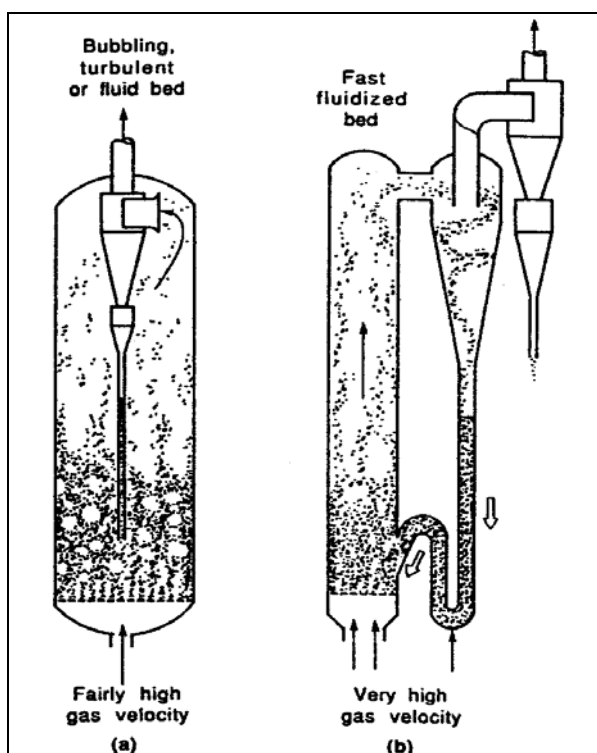


Figura 2.2. Ejemplos de lecho fluidizado circulante: (a) Lecho fluidizado turbulento con ciclón interno; (b) Lecho fluidizado de fase dispersa con ciclón externo. [1]

Otro fenómeno que se puede producir en el contacto gas-sólido es un chorro de gas que se abre paso entre el lecho. Esto es denominado “lecho de chorro” o “spouted bed” (Figura 2.3). Si se opera el gas a alta velocidad, éste penetra a través del lecho de partículas transportando así algunas de ellas hasta la parte alta del lecho. El resto de partículas caen lentamente alrededor del chorro y entre el gas que se filtra con suavidad hacia arriba. En ocasiones se observa una combinación de comportamientos entre burbujeante y de chorro, que se le suele denominar “lecho fluidizado de chorro”.

Comparado con otros métodos de contacto gas-sólido, los lechos fluidizados tienen algunas propiedades características y de gran utilidad. En el caso de lechos fluidizados de líquido-sólido la utilidad es menor por razones asociadas a su comportamiento, de modo que hasta ahora las aplicaciones industriales de fluidización más importantes están basadas en sistemas de tipo gas-sólido.

Aunque el comportamiento o régimen de funcionamiento esta fuertemente influenciado por la velocidad superficial del gas o del liquido empleado, en el capítulo 5 veremos cómo las características de las partículas utilizadas deben de ser cuidadosamente elegidas para cada fin ya que delimitan el tipo de operación.

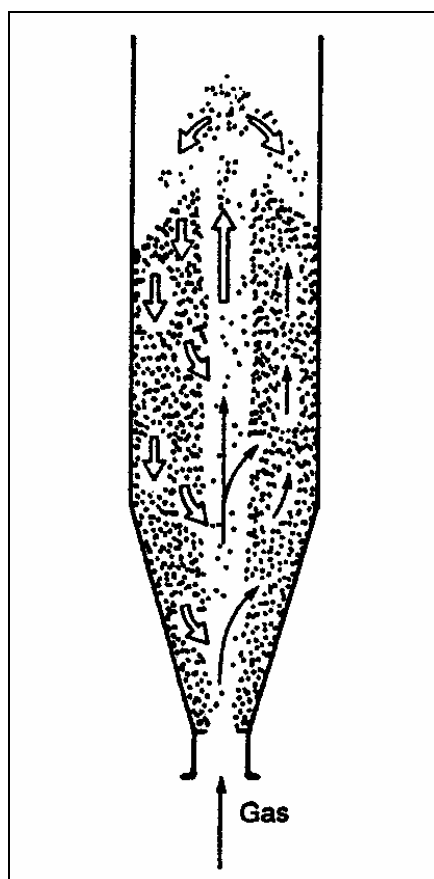


Figura 2.3. Lecho de chorro. [1]

2.2. COMPORTAMIENTO DE UN LECHO FLUIDO.

Con sencillos experimentos podemos ilustrar el comportamiento de un lecho fluido. A continuación se describen comportamientos de los lechos fluidos semejantes al de los líquidos.

Un lecho de partículas de fase densa fluidizado con gas se asemeja mucho a un líquido en ebullición y, en muchos aspectos, muestra un comportamiento similar al de un fluido. De esta manera, un objeto de tamaño grande y poca densidad que se sumerge en el lecho fluidizado aparece inmediatamente en la superficie al dejarlo libre y flota. Al contrario, si tenemos un lecho fluido e introducimos un objeto de mayor densidad éste se hundirá rápidamente (figura 2.4(a)).

Si tenemos un recipiente con líquido y lo inclinamos éste iguala el nivel de su superficie permaneciendo horizontal. De igual forma, en un lecho fluido la superficie permanece horizontal si lo inclinamos (figura 2.4(b)).

Ahora, si consideramos el comportamiento del flujo de un líquido cuando hacemos un orificio en el recipiente que lo contiene, éste sale en forma de chorro. Ocurre lo mismo en un lecho fluido en el que practicamos un agujero (figura 2.4(c)).

En el caso de tener dos lechos fluidizados comunicados entre sí, se iguala el nivel de ambos (figura 2.5(a)). Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos, igual que ocurre en fluido-estática (figura 2.5(b)).

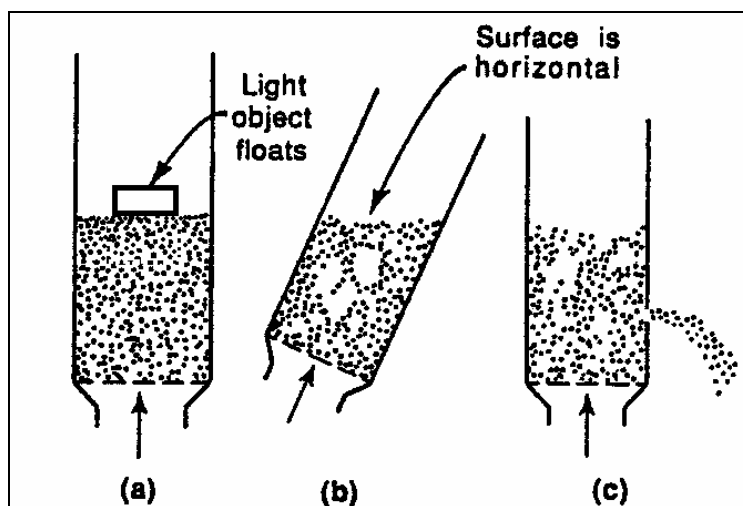


Figura 2.4. Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado: (a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie del lecho; (b) La superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho; (c) Las partículas abandonan el lecho describiendo un chorro a través de un orificio practicado en la pared.[1]

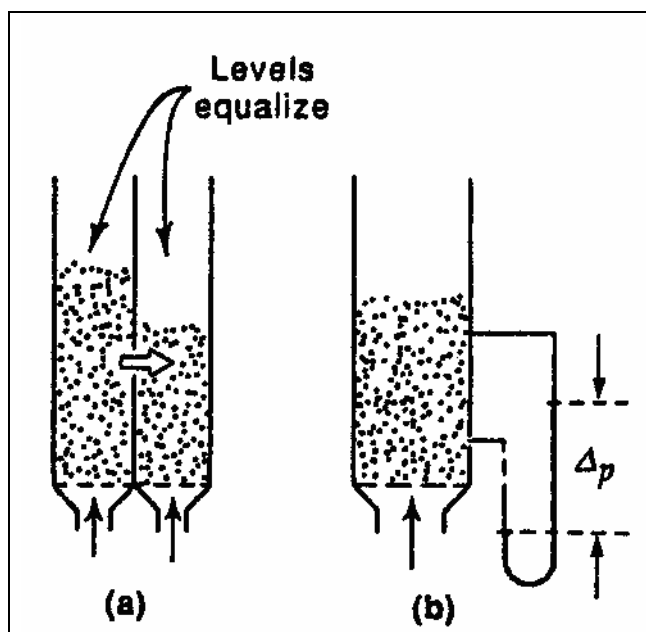


Figura 2.5. Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado: (a) Al poner en contacto dos lechos sus niveles se igualan; (b) La diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos. [1]

Conociendo el comportamiento fluido que presentan los lechos fluidizados podemos diseñar aplicaciones industriales atendiendo a sus propiedades, así como al tipo de contacto.

2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS LECHOS FLUIDOS.

Como hemos visto hasta este punto, las propiedades de los lechos fluidos confieren a estos ciertas características especiales para su uso en aplicaciones industriales. Durante su operación, a parte de las características que les hacen útiles para ciertas aplicaciones existen otras características indeseables que se deben evitar. En este apartado enumeraremos las ventajas y desventajas de los lechos fluidos. A continuación se presentan las ventajas:

- El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite un control sencillo y continuo.
- El mezclado rápido de las partículas permite alcanzar iguales condiciones de temperatura en el lecho, lo que conlleva un control sencillo y seguro de operaciones isotérmicas.
- Un lecho con partículas bien mezcladas resiste las rápidas variaciones de temperatura, y responde lentamente a los cambios bruscos en las condiciones



de operación y ofrece un gran margen de seguridad, evitando pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.

- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible conservar (o suministrar), grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar), en grandes reactores.
- Los lechos fluidos se pueden utilizar en operaciones de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores comparados con otros modos de contacto.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en su interior es alta, con lo cual los intercambiadores de calor en los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

En contraposición con las ventajas del uso de los lechos fluidos en aplicaciones industriales, existen una serie de desventajas:

- La presencia de burbujas en lechos burbujeantes disminuye el mezclado entre la fase densa y el gas que atraviesa el lecho en forma de burbujas.
- El rápido mezclado de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. El tratamiento continuo de sólidos proporciona productos no uniformes y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.
- En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

El menor coste de operación de los lechos fluidizados frente a otros reactores es el principal incentivo para su aplicación en la industria.

2.4. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA FLUIDIZACIÓN.

Gracias a las buenas propiedades que presentan los lechos fluidos su uso se ha extendido en el ámbito industrial. Desde la aparición del primer gasificador de carbón en 1926, se han desarrollado muchas aplicaciones industriales basadas en la fluidización. A lo largo de su corta historia, se han desarrollado principalmente aplicaciones para la industria petroquímica y metalúrgica.

A lo largo de este apartado realizaremos un repaso por las diversas aplicaciones actuales de la fluidización. Podemos clasificar los procesos según su naturaleza en operaciones físicas, reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, carbonización y gasificación, calcinación, reacción con sólidos, y biofluidización. A la vista de la clasificación podemos comprobar que el uso de los lechos para aplicaciones térmicas juega un papel muy importante.

2.4.1. OPERACIONES FÍSICAS.

2.4.1.1. Intercambio de calor.

Por su capacidad de intercambio rápido de calor así como de mantener constante la temperatura, los lechos fluidizados se utilizan desde hace tiempo como intercambiadores de calor. Suelen ser también utilizados para conseguir ciertas propiedades en tratamiento de metales a través del control de su enfriamiento después de ser sometidos a un proceso de calentamiento o de forja (figura 2.6(a)).

En cuanto a los intercambiadores de calor, el intercambio puede producirse sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración que circula por tubos en el interior del lecho fluidizado (figura 2.6(b)). Un intercambio que se utiliza comúnmente consiste en hacer circular agua a través de tubos sumergidos en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura recuperando el calor contenido en éstas para producir vapor (figura 2.6(c)).

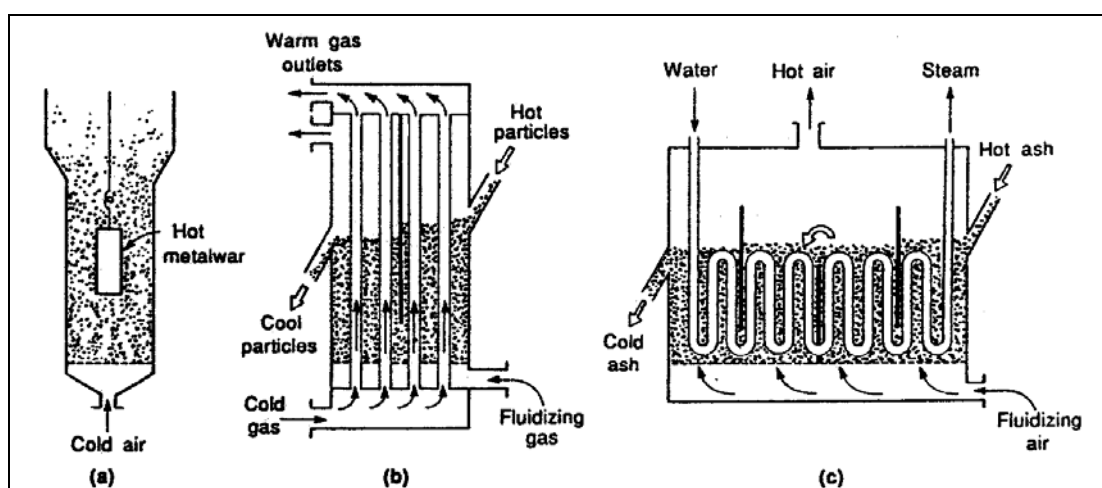


Figura 2.6. Intercambiadores de calor en lecho fluidizado: (a) Enfriamiento rápido de metales; (b) Intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) Generación de vapor a partir de ceniza caliente. [1]



2.4.1.2. Recubrimiento de metales.

El recubrimiento plástico de metales se consigue mediante un lecho fluido formado por pequeñas partículas de plástico en las cuales se sumerge un metal caliente a una temperatura superior a la de fusión del plástico. De esta manera el plástico se queda adherido a la superficie del metal formando una capa que aumenta exponencialmente con el tiempo de estancia del metal caliente en el lecho.

Debido a que el acabado del plástico adherido es rugoso, posteriormente se realiza un tratamiento de alisado consistente en introducir la pieza plastificada en una corriente de aire caliente. Este proceso puede utilizarse para piezas con formas complejas. El proceso es económico y el uso del material es completo.

2.4.1.3. Secado de sólidos.

Los secadores de lecho fluido se usan en gran número de aplicaciones industriales debido a su gran capacidad, su bajo coste de construcción, su fácil operación y su alta eficiencia térmica. Se pueden emplear para secar cualquier tipo de sólido húmedo, minerales, arena, polímeros, productos farmacéuticos o fertilizantes, siempre que estos puedan ser fluidizados con gas caliente. Las acerías utilizan grandes secadores para secar el carbón antes de introducirlo en los hornos. También se utilizan secadores de menor tamaño pero no de menor eficiencia en la industria farmacéutica y otras pequeñas industrias químicas.

Para secar materiales inorgánicos se suelen utilizar lechos de una sola etapa (figura 2.7(a)). No se controla el tiempo de residencia de las partículas en el lecho porque no es importante, ya que sólo es suficiente con mantener la temperatura del lecho entre 60°C y 90°C hasta que se evapora el vapor de agua contenido en los sólidos.

Cuando las partículas requieren tiempos de secado específicos, o los materiales son muy delicados, como productos farmacéuticos que requieren tiempos idénticos de secado, el tiempo de residencia es importante y debemos controlarlo. En este caso necesitaremos lechos multietapas o lechos con distribuidores rotativos (figura 2.7 (b) y (c)), ya que con un lecho de una sola etapa pueden existir partículas que atraviesen rápidamente el lecho sin que exista apenas contacto con el gas.

El secado de sólidos se realiza mediante fluidización con aire caliente, aunque existen diseños en los que el calor se aporta mediante conductos sumergidos en el lecho, reduciendo el volumen de gas necesario. Para aplicaciones en las que se requiere mayor eficiencia, por ejemplo en secado de sólidos muy húmedos, podemos fluidizar con vapor sobrecalentado a alta presión.

Para sólidos que contienen cantidades considerables de disolventes como metanol o tolueno, presentando cierto riesgo de explosión, se emplea gas inerte, vapor de agua o el propio vapor del disolvente en un sistema cerrado con intercambiadores de tubos (figura 2.7 (d)).

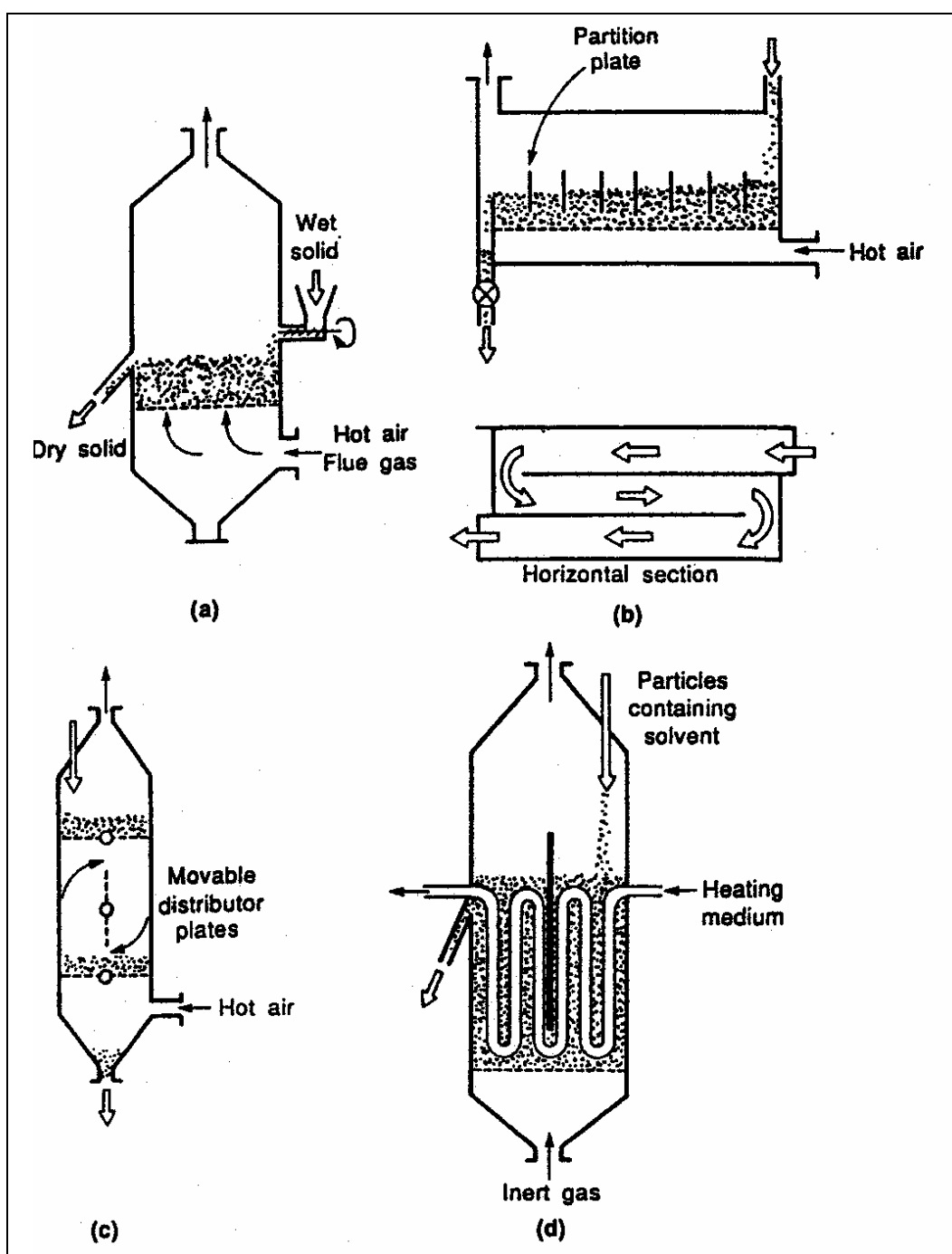


Figura 2.7. Fluidización en procesos de secado: (a) Diseño de una sola etapa; (b) Diseño multietapa; (c) Diseño con distribuidor rotatorio para asegurar tiempos de residencia uniformes; (d) Diseño para partículas que contienen disolventes. [1]

Cuando los sólidos que tenemos que secar son pegajosos o se apelmazan con facilidad, se emplean lechos fluidos vibratorios en los que el distribuidor de aire vibra impidiendo que los sólidos se aglomeren.

2.4.1.4. Recubrimiento de objetos y crecimiento de partículas.

Cuando una solución de sal, como el glutamato sódico (el glutamato monosódico es la sal sódica del aminoácido conocido como ácido glutámico o glutamato, que se encuentra de forma natural en numerosos alimentos como los tomates, setas, verduras e incluso en la leche materna), es inyectado o rociado en un lecho caliente de partículas secas, como el cloruro sódico, las superficies de las partículas se humedecen. El consecuente secado de la capa líquida proporciona un eficiente proceso de recubrimiento (por ejemplo, la sal de mesa se prepara de esta manera). Este tipo de operación también es usado para recubrir soluciones de sal o de las mezclas de alimentos sólidos finos. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de este tipo de operación.

El tamaño de producto y su distribución pueden ser controlados por el tamaño de las partículas de semilla, y ajustando la proporción de líquido-sólido.

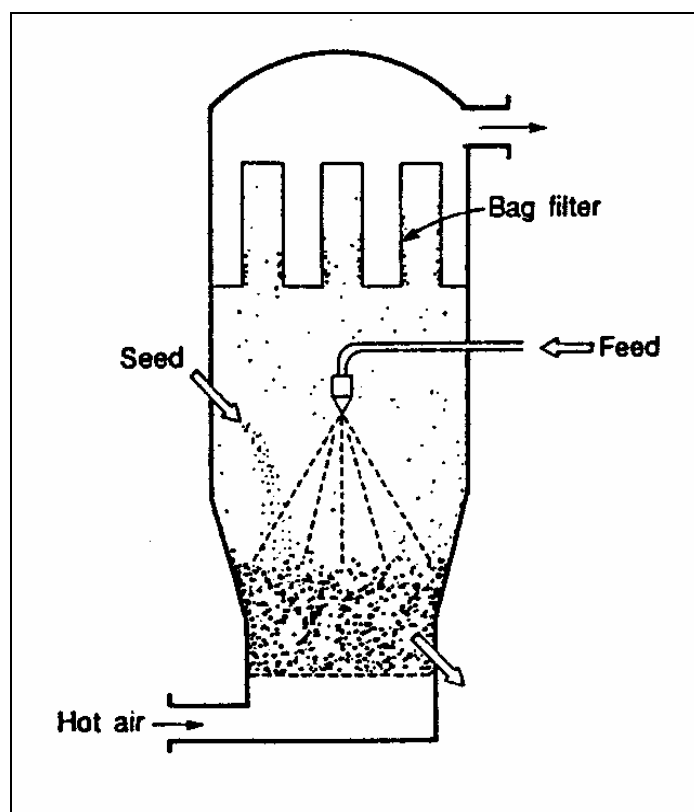


Figura 2.8. Recubrimiento y/o crecimiento de partículas. [1]

Por otra parte, la solución que rociamos o inyectamos puede actuar como medio para partículas que se aglomeran por sequedad. En estas operaciones, es importante conocer el mecanismo de aglomeración.

Para un diseño correcto es necesario tener en cuenta ciertos aspectos tales como la posición apropiada del rociador, para evitar la aglomeración imprevista de alimentos sólidos y evitar que las paredes del lecho se recubran de sólidos.

2.4.1.5. Adsorción.

En ocasiones, es necesario eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas. En estos casos, los procesos continuos de adsorción mediante fluidización a través de múltiples etapas llegan a ser muy efectivos. En la adsorción por lecho fluidizado los componentes se adsorben de forma periódica con partículas de carbón activo y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo), se llevan a cabo en el mismo lecho. Ejemplos de aplicación son la retirada y concentración de solventes como disulfuro de carbono, acetona, etanol y acetato de etilo, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales. En la siguiente figura se puede observar una instalación de adsorción en lecho fluido.

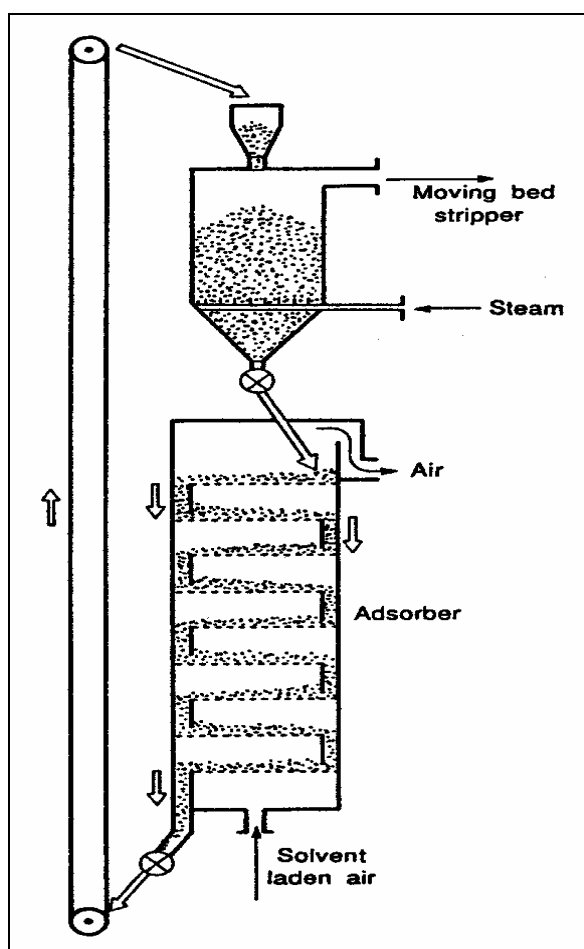


Figura 2.9. Adsorción en lecho fluidizado desarrollado por Courtaulds Ltd.. [1]

2.4.2. REACCIONES DE SÍNTESIS.

La necesidad de mantener un estricto control de la temperatura en la zona en la que se produce la reacción hace que el uso de lechos fluidizados en fase gas con catalizadores sólidos suponga una gran ventaja frente a los lechos fijos. Dicha necesidad esta justificada por las siguientes razones:

- La operación puede ser explosiva fuera de un estrecho rango de temperaturas.
- La obtención de los productos deseados es dependiente de la temperatura de operación.
- La concentración de altas temperaturas en el catalizador puede producir su rápido deterioro.
- Las reacciones son exotérmicas lo que hace muy difícil en control de la temperatura.

Debido a que los gases presentan malos coeficientes de transferencia de calor y muy bajos valores de capacidad calorífica, comparados con sus calores de reacción, resulta difícil alcanzar el control de temperatura necesario utilizando lechos fijos. En estos sistemas son necesarias extensas superficies de intercambio de calor y grandes diluciones de gases reactantes. Este control es mucho más fácil de conseguir en lechos fluidizados porque la rápida circulación de las partículas, con una capacidad calorífica relativamente alta, distribuye el calor y ayuda a eliminar las posibles zonas de alta concentración de calor.

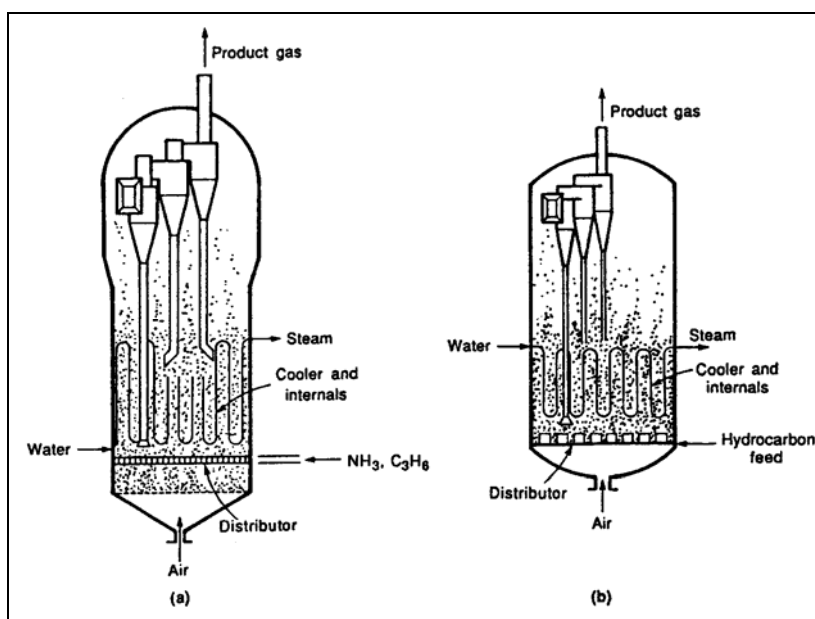


Figura 2.10. Reactores para reacciones altamente exotérmicas. (a) Sohio, producción de acrilonitrilo; (b) Mitsubirhi Chemical, [1]



Year	Product or Reaction	Process	Type
1945	Phthalic anhydride	Sherwin-Williams-Badger	FB
1955	Fischer-Tropsch synthesis	Kellogg, Sasol	FFB
1956	Vinyl acetate	Nihon Gosei	FB
1960	Acrylonitrile	Sohio	FB
1961	Ethylene dichloride	Monsanto	FB
1965	Chloromethane	Asahi Chemical	FB
1970	Maleic anhydride	Mitsubishi Chemical	FB
1977	Polyethylene (low density)	Union Carbide	BB
1984	Polypropylene	Mitsui Petrochemical	BB
1984	<i>o</i> -cresol and 2,6-xyleneol	Asahi Chemical	FB

Tabla 2.1. Ejemplos de reactores catalíticos comerciales de lecho fluido. FB: Lechos fluidos de partículas finas; FFB: lechos fluidos rápidos; BB: lechos fluidos burbujeantes para partículas grandes. [1]

2.4.3. CRAQUEO DE HIDROCARBUROS.

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, denominadas reacciones de craqueo, está dominada por dos características fundamentales: las reacciones son endotérmicas, y en las superficies de los sólidos cercanos se deposita carbono. Estas características junto con las grandes cantidades de material a tratar determinan el tipo de proceso utilizado industrialmente para estas reacciones. Básicamente, estos procesos se dividen en dos partes:

- Absorción de calor, reacción y deposición de carbono.
- El carbono depositado se quema y se recupera el calor.

El calor recuperado del carbón depositado se devuelve al primer módulo para alimentar la reacción mediante las propias partículas en recirculación. La única forma en que esto se puede desarrollar de manera eficiente es con un sistema de circulación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. En la actualidad todos los procesos de craqueo se realizan con este tipo de operación.

Existen dos procesos de craqueo catalítico en los que se utilizan lechos fluidos: craqueo catalítico fluido (FCC), y craqueo térmico. El craqueo térmico se utiliza para la producción de etileno y propileno, utilizados como elementos de partida en síntesis orgánicas y polimerizaciones.

2.4.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC).

En contacto con el catalizador adecuado los hidrocarburos pesados en fase vapor se “rompen” en elementos de menor peso molecular. Son numerosos factores involucrados, y la clave para desarrollar el proceso de craqueo con éxito es el modo en que se suministra la gran cantidad de calor necesaria para la reacción endotérmica, y la manera efectiva de regenerar rápidamente las partículas catalizadoras. El método de craqueo catalítico fluido lleva a cabo simultáneamente la regeneración de las partículas

catalizadoras y el aporte de calor de reacción. Por ello, el proceso FCC es el de aplicación más extensa en el craqueo de hidrocarburos.

La principal característica de este proceso es la unión de las dos unidades: primero, un reactor a una temperatura entre 480°C y 540°C, donde el petróleo suministrado en fase vapor se fragmenta en contacto con las partículas catalizadoras a alta temperatura. Después de un determinado tiempo de residencia, las partículas se transportan al regenerador que se encuentra alrededor de 580°C, y es allí donde los depósitos de carbono se queman y se reducen desde el 1-2% hasta el 0.4-0.8%. Las partículas calientes después de 5-10min se devuelven al reactor.

Como podemos comprobar, las características de generador, el reactor, y el transporte de partículas entre procesos hace ventajoso el uso de lechos fluidos.

El modelo Exxon's II fue la primera unidad FCC utilizada con éxito industrial y desde entonces sucesivas mejoras y nuevos diseños para aumentar la capacidad han dado con los modelos actuales. Numerosas son las compañías y laboratorios que han desarrollado sus propias unidades de craqueo pero el fundamento en todos los casos es el mismo y se emplean lechos fluidizados. Las mejoras introducidas se encaminan hacia el diseño del transporte y el uso de diferentes tamaños y tipos de catalizador así como acople entre el generador y el reactor. En la figura 2.11 se muestran algunos diseños.

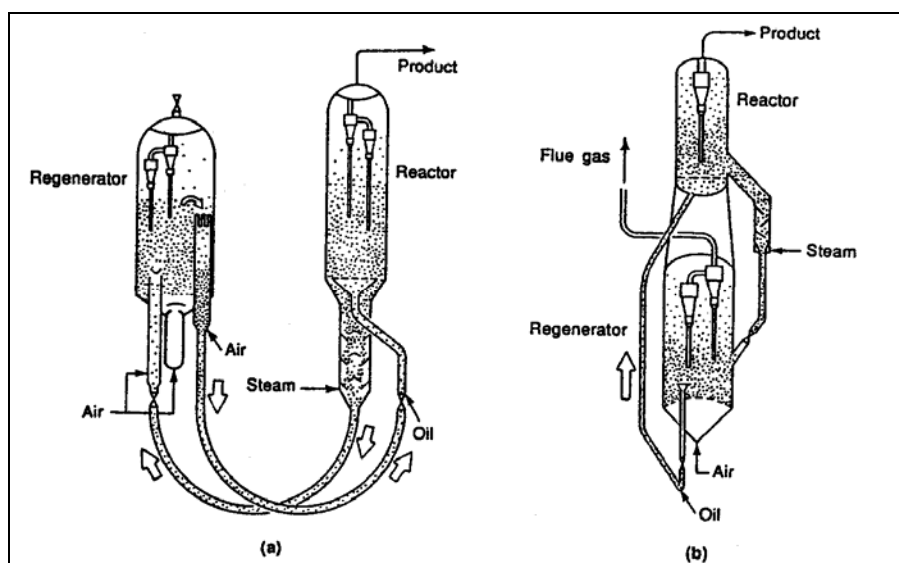


Figura 2.11. Unidades de craqueo catalítico fluido: (a) Modelo Exxon IV; (b) Modelo diseñado por Universal Oil Products Company. [1]

2.4.4. COMBUSTIÓN E INCINERACIÓN.

2.4.4.1. Combustión de carbón en lecho fluido.

A comienzos de los años 1970s empezó a desarrollarse la combustión en lecho fluidizado (FBC), por varias potencias tecnológicas debido a la crisis del petróleo. El objetivo era alcanzar una forma óptima de combustión del carbón de baja calidad y combustibles que no se pudiera quemar en calderas convencionales como alternativa al petróleo. Se desarrollaron unidades relativamente compactas y viablemente económicas que en determinadas circunstancias locales obtenían una combustión eficiente.

Uno de los primeros diseños estaba basado en un flecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En primer lugar se fluidizan partículas de caliza o dolomita con aire, y posteriormente se introducen partículas pequeñas de carbón (3-6mm). Debido a la velocidad del gas se pierden partículas que suelen contener carbón sin quemar. Para evitar su emisión al ambiente debemos atraparlas mediante ciclones.

Las partículas de caliza y dolomita capturan bien los componentes de azufre si el lecho lo mantenemos a $\sim 850^{\circ}\text{C}$, y por lo tanto los intercambiadores de calor pueden ir en el interior del propio lecho. Para obtener un mejor rendimiento también se instalan intercambiadores a la salida de los gases para aprovechar el calor residual.

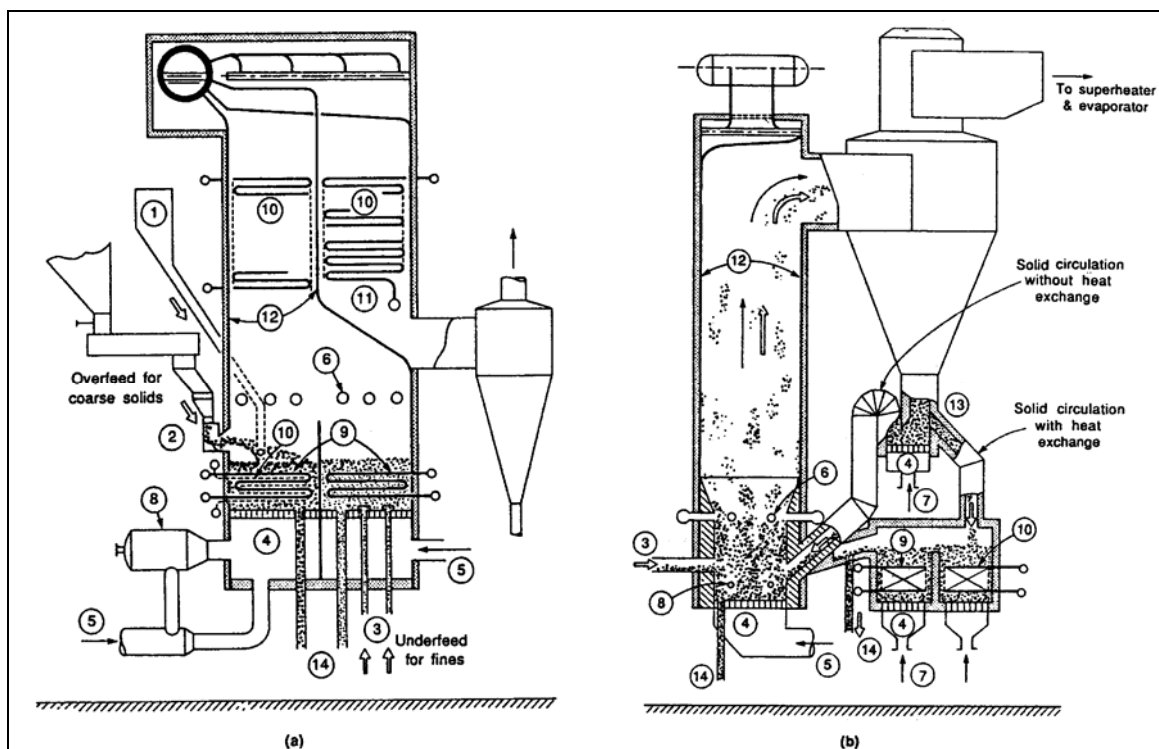


Figura 2.12. Combustión de carbón en lecho fluidizado. (a) Lecho burbujeante; (b) Circulación de sólidos. 1.Tolva de caliza; 2.Conducto de alimentación; 3.Alimentación de carbón-caliza; 4.Distribuidor de aire; 5.Entrada de aire principal; 6.Boquilla de aire secundaria; 8.Generador de gas a alta temperatura; 9.Evaporador; 10.Sobrecalentador; 11.Economizador (precalentador de agua); 12.Circulación de agua; 14.Conducto de retirada de residuos. [1]

Los lechos generan menos NO_x y SO_x ya que son capaces de trabajar a menor temperatura.

Existen numerosos diseños comerciales que emplean diferentes técnicas a la comentada; unidades a pequeña y a gran escala, a presión atmosférica o a alta presión. En la figura 2.12 se muestran dos modelos de combustión de carbón.

2.4.4.2. Incineración de residuos sólidos.

En áreas pobladas es inevitable la incineración de residuos sólidos urbanos utilizándose normalmente quemadores de parrilla. Dichos sistemas son problemáticos en determinadas ocasiones debido a la emisión de fuertes olores, a pesar de ser eficientes térmicamente.

Los problemas asociados se pueden evitar con incineradores de lecho fluidizado, que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos. En el proceso los residuos son triturados retirándose previamente los elementos metálicos, y fluidizándose el resultado en el incinerador. La temperatura alcanzada en la operación del lecho es del orden de 800-900°C, produciéndose la quema y descomposición de los elementos orgánicos.

El calor sobrante es evacuado del lecho mediante circulación de agua, para aprovechar la energía residual. La ceniza se elimina por la parte inferior del lecho y los sólidos se queman por completo.

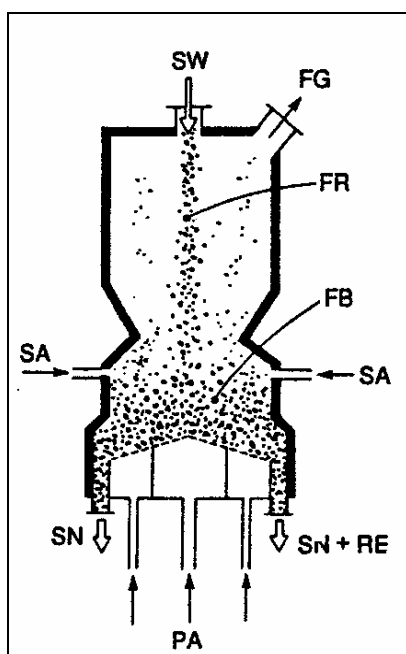


Figura 2.13. Incinerador en lecho fluidizado modelo Ebara. SW: residuo sólido; FG: gas residual; FR: superficie libre; FB: lecho fluidizado; SA: entrada de aire secundaria; SN: arena; RE: residuos; PA: entrada principal. [1]

El tratamiento posterior de los residuos debe ser el adecuado para poder mejorar la eficiencia de estos sistemas, con el fin de eliminar los materiales inorgánicos. Por otra parte es necesario garantizar la calidad de las emisiones mediante el uso de filtros adecuados.

2.4.5. CARBONIZACIÓN Y GASIFICACIÓN.

2.4.5.1. Gasificación de carbón.

Como se mencionó en el primer apartado, el gasificador de carbón de Winkler fue la primera aplicación con importancia de los lechos fluidizados en el ámbito comercial. En los años 1950s la abundancia y el bajo precio del petróleo y el gas natural hizo que este tipo de gasificadores desapareciera.

La crisis del petróleo de los años 1970s produjo el retorno al uso del carbón, aumentando el número de empresas que iniciaron estudios de viabilidad y proyectos para la obtención de un sustituto eficiente del petróleo.

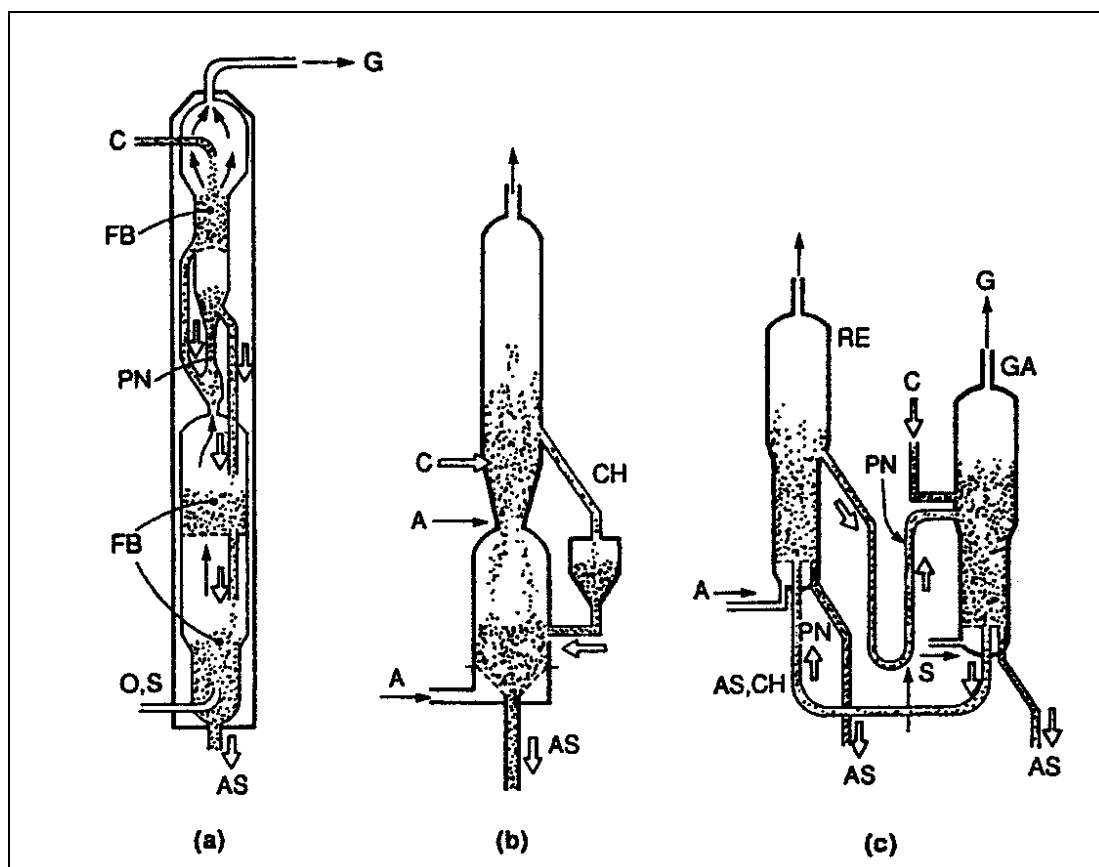


Figura 2.14. Gasificación de carbón en lecho fluidizado. (a) Modelo Hygas, (b) Modelo Mitsubishi; (c) Modelo Union Carbide. A: aire; AS: ceniza; C: carbón; CH: producto sólido; FB: lecho fluido; GA: gasificador; G: gas producto; PN: transportador neumático; RE: regenerador; S: vapor; W: agua. [1]

En el proceso de la gasificación se quema la materia sólida, carbón en este caso, con aporte mínimo de oxígeno. Su objetivo es principalmente la eliminación de partículas y otras impurezas del combustible sólido convirtiéndolo así en gas para poder ser utilizado en sistemas de combustión exigentes en lo que a la calidad del combustible se refiere. El producto sólido resultante en la gasificación (char), está formado por cenizas y residuos carbonosos.

Existen diferentes agentes para llevar acabo el proceso de la gasificación como son el aire, oxígeno, vapor de agua, ó hidrógeno, y depende de ellos el contenido energético del gas que obtenemos.

Se han realizado infinidad de diseños sobre gasificadores de carbón en lecho fluidizado, desde procesos con un solo lecho hasta procesos de múltiples lechos, con recirculación de partículas, operando a alta presión y fluidizados con diferentes agentes gasificantes.

2.4.5.2. Gasificación de residuos sólidos.

En ocasiones los residuos sólidos urbanos suelen contener materiales tóxicos y peligrosos. Todo esto hace que en las plantas de incineración ordinarias sea necesaria la implantación de equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias y normativas medioambientales vigentes. A pesar de esto, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta más simple y barata porque el volumen de gas producido es menor que en las incineradoras, resultando el tratamiento de residuos sólidos mucho más ventajoso.

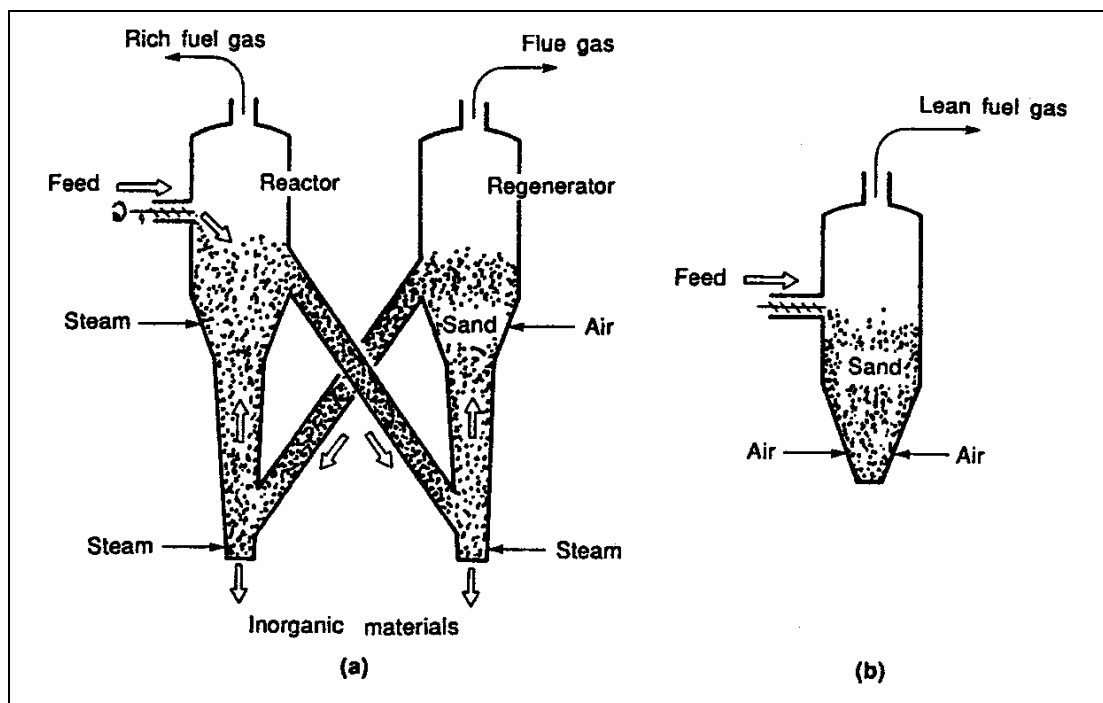


Figura 2.15. Gasificación de residuos sólidos en lecho fluidizado. (a) Proceso Pyrox (desarrollado por Tsukishima Co), (b) Proceso Tsukishima Co. [1]

Un claro ejemplo de gasificador en lecho fluidizado es el empleado en el proceso Pyrox (Figura 2.15(a)). Este proceso consta de dos lechos fluidizados conectados por dos conductos en pendiente descendente.

De forma continua los residuos son triturados e introducidos en el gasificador junto con vapor para producir gas combustible enriquecido. La materia sólida sobrante es enviada al regenerador junto con la arena del lecho donde se llevará acabo su combustión. Los gases residuales se expulsan y se devuelve la arena caliente al gasificador proporcionándose la energía suficiente para la gasificación posterior.

2.4.5.3. Activación de carbón.

Para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas se emplea carbón activado, el cual sirve para la separación de sustancias orgánicas en la recuperación de solventes, y como catalizador. Para la activación del carbón a través de lecho fluidizado suele emplearse como materia prima el propio carbón, madera u otros residuos vegetales (cáscara de coco o cacahuete).

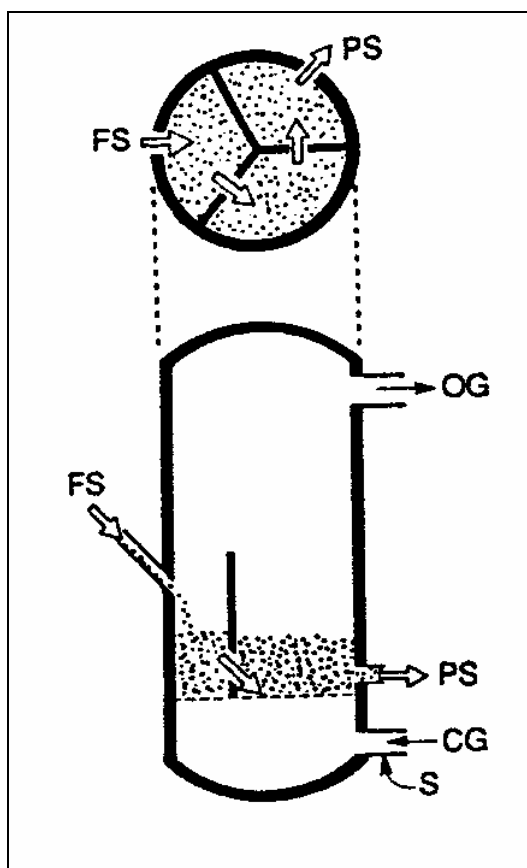


Figura 2.16. Activación de carbón en lecho fluidizado. PS: Productos sólidos; OG: Gas de escape; CG: Gas de combustión; S: Vapor; FS: Alimentación de sólidos. [1]

El proceso de la activación se divide en dos fases: la carbonización de los sólidos precursores y la activación o gasificación del carbonizado, que tiene lugar a una temperatura de 800–1000°C. En el proceso se eliminan elementos tales como H_2 y O_2 de los precursores, para obtener como resultado un esqueleto carbonoso.

En la gasificación el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o combinación de éstos), de manera que se eliminan los átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica.

Las unidades multietapa proporcionan una distribución del tiempo de residencia más uniforme de los sólidos y ayudan a recuperar el calor para la gasificación a través de la combustión posterior del CO y H_2 procedentes del proceso de la carbonización.

2.4.6. CALCINACIÓN.

De manera sencilla se pueden calcinar partículas de caliza y dolomita en un lecho fluidizado quemando directamente combustible en el lecho. La reacción resultante de dicho procesos es altamente endotérmica por lo que supone un elevado derroche de combustible. Para poder recuperar gran parte del calor que se ha perdido en el proceso se suelen emplear sistemas multietapa, donde el material bruto se introduce por la etapa superior y va cayendo de etapa en etapa.

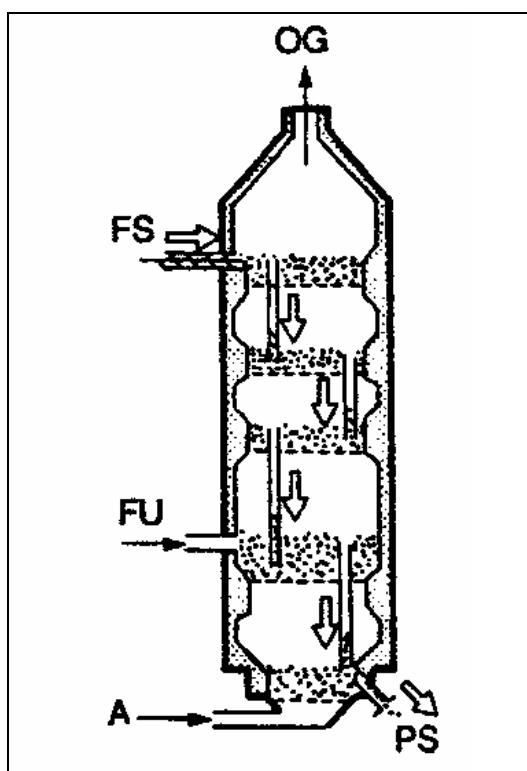


Figura 2.17. Calcinación de caliza en lecho fluidizado.
OG: gas de escape; PS: productos sólidos; A: aire;
FU: combustible; FS: alimentación de sólidos. [1]

En la calcinación se inyecta el combustible en una de las etapas inferiores, donde que se mezcla con el aire de fluidización quemando las partículas de material. El calor residual sirve para aumentar la temperatura de las partículas de las fases superiores, abandonando el lecho por la parte inferior los restos calcinados.

2.4.7. REACCIONES CON SÓLIDOS.

Los lechos fluidizados son utilizados para modificar características de minerales a través de determinadas reacciones. Un buen ejemplo es la tostación para poder obtener metales a partir de sulfuros de mineral. La reacción resultante se caracteriza por ser una oxidación levemente exotérmica, con lo que se suelen emplear lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o con una ligera refrigeración.

Al requerir estas unidades menor exceso de aire, se obtienen gases de escape con una concentración mayor de dióxido de azufre, es por ello que lo tenemos que tener presente de cara a cumplir las exigencias medioambientales.

Los lechos fluidizados también son utilizados para la producción de silicio de elevada pureza para la fabricación de semiconductores y células solares. La obtención de silicio puro a partir de silicio de grado metalúrgico, se lleva a cabo a través de diversos pasos sobre los que se han desarrollado diferentes unidades de lecho fluidizado.

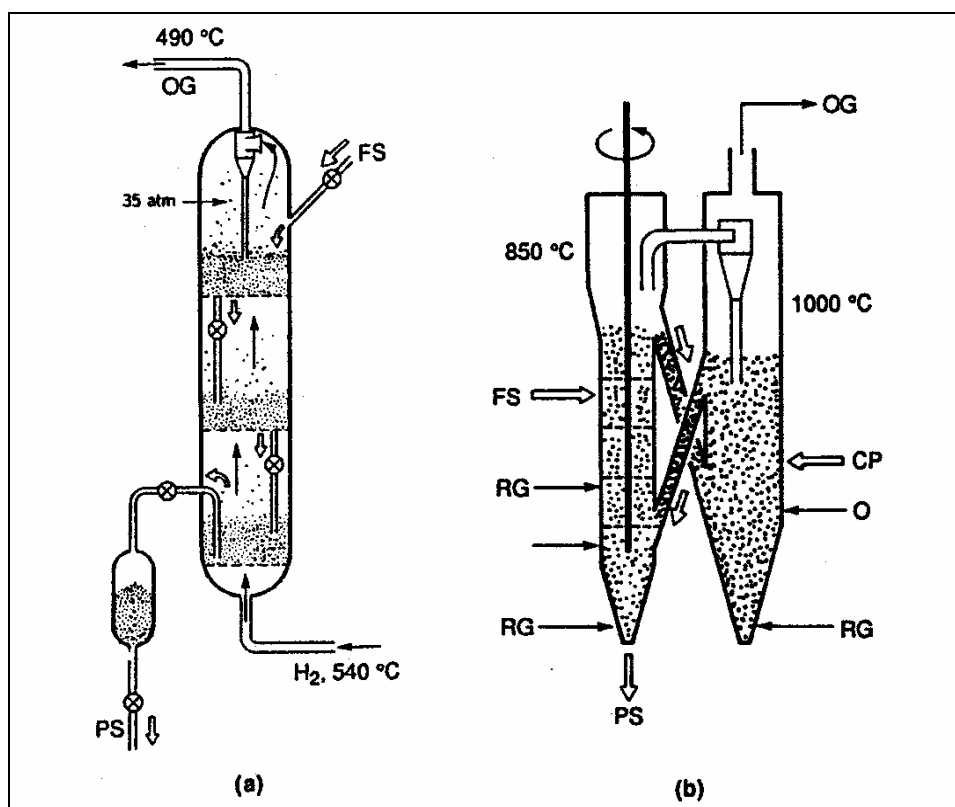


Figura 2.18. Reducción de óxidos de hierro. (a) Proceso H-Iron; (b) Proceso Kawasaki Iron and Steel. CP: partículas de coque; OG: salida de gas; FS: alimentación de sólidos; PS: productos sólidos; RG: gas reducido; O: oxígeno. [1]

Otra aplicación de los lechos fluidizados es la reducción de óxidos de hierro, para producir hierro y acero a partir de partículas de mineral de alto grado. Hay varios procesos que se han desarrollado sobre esta aplicación, desde unidades de varias etapas hasta unidades donde la reducción se lleva a cabo de forma directa y con más eficiencia. La figura 2.18 muestra una unidad de reducción directa, donde las partículas de mineral de hierro se introducen a 700°C en el reactor, que dispone de distribuidores rotatorios para evitar la posible aglomeración de sólidos. Además incluye partículas de coque que se recirculan entre reactor y calentador, donde el carbón se quema y gasifica con oxígeno. El gas de escape del calentador se puede tratar y usar para alimentar el reactor.

2.4.8. BIOFLUIDIZACIÓN.

Una de las aplicaciones más peculiares de la fluidización es el cultivo de microorganismos. En la figura 2.19 se muestra un diseño desarrollado para cultivar el hongo “*Aspergillus Sojae*”, en la producción de salsa de soja.

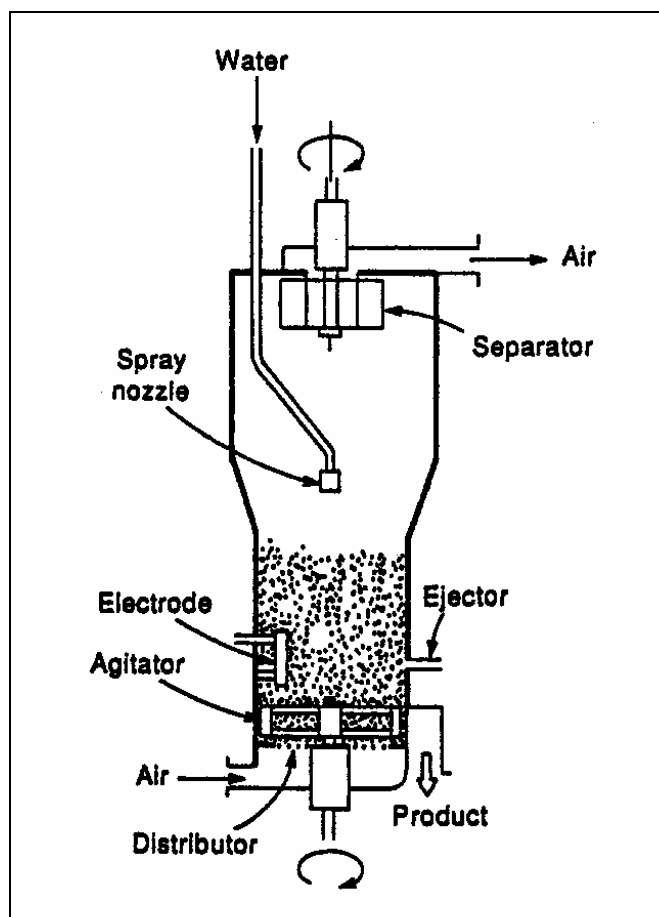


Figura 2.19. Producción de salsa de soja. Modelo desarrollado por Kikkoman Co. [1]



El primer paso es tratar el trigo y pasteurizarlo con vapor sobrecalentado, fluidizándose más tarde con aire esterilizado. El lecho es rociado con agua para que se mantenga la humedad al nivel deseado y posteriormente son introducidas las semillas de microorganismos mediante un eyector.

Resulta mucho más ventajoso el cultivo de microorganismos en lechos fluidizados que el cultivo convencional por varios motivos:

- Mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos.
- Fácil transferencia de oxígeno lo que activa el metabolismo.
- Eficiencia en la eliminación del calor y CO_2 generado por el Metabolismo.
- Facilidad para controlar temperatura, humedad y pH.

3. CONCEPTOS TEÓRICOS DE FLUIDIZACION.

En el presente capítulo trataremos teóricamente dos aspectos fundamentales que caracterizan a los lechos fluidos: la pérdida de carga a través del lecho y la velocidad mínima de fluidización.

3.1. PERDIDA DE CARGA.

El movimiento ascendente del gas a través de un lecho de partículas, experimenta una pérdida de carga por la resistencia que ofrecen estas al paso del mismo. En la figura 3.1 se muestra un comportamiento característico de los sistemas gas-sólido.

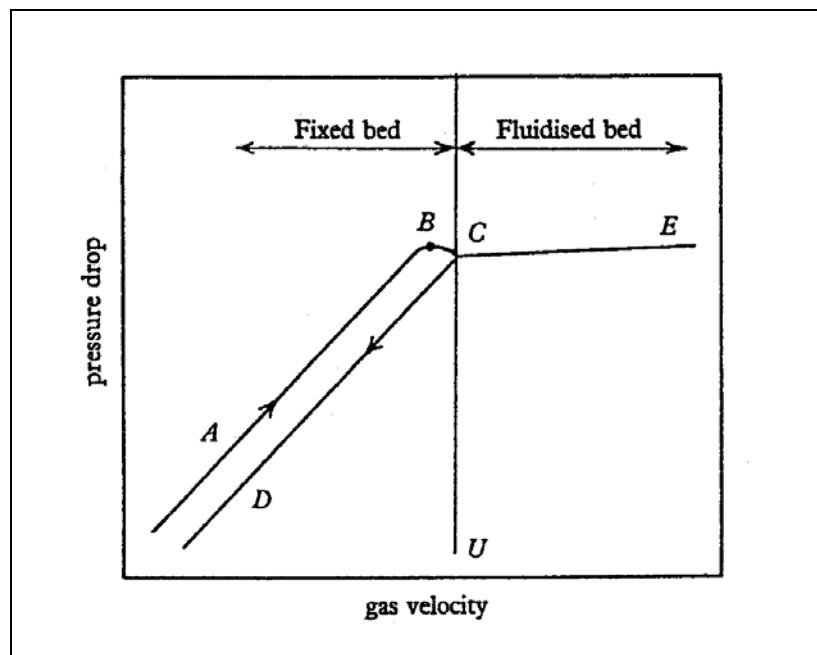


Figura 3.1. Curva Pérdida de carga-Velocidad para sistemas tipo gas-sólido. [2]

La figura muestra la relación entre la pérdida de carga en el lecho y la velocidad superficial del gas. En el eje de abscisas tenemos representada la velocidad del gas y en el eje de ordenadas la pérdida de carga del flujo de gas en el lecho. Si partimos desde $U=0$, podemos observar como a medida que aumentamos la velocidad del gas la pérdida de carga en el lecho aumenta linealmente (recta A). En el punto B la pérdida de carga en el lecho es mayor que la necesaria para mantener las partículas en suspensión. Si aumentamos levemente la velocidad la presión cae hasta justo lo necesario para soportar el peso de las partículas (C). Las condiciones del punto C se denominan condiciones de mínima fluidización.

Si desde C disminuimos la velocidad hasta $U=0$ (recta D), comprobamos que existe una cierta histéresis ya que no coincide la pérdida de carga al aumentar y al disminuir la velocidad. Esto es debido a que cuando fluidizamos el lecho es necesario vencer las fuerzas de atracción existentes entre las partículas mientras que si lo defluidizamos no es necesario vencer esta fuerza. El punto B es más acentuado cuanto mayor es la relación de compactación de las partículas. Podríamos hacer coincidir ambas curvas si repitiésemos el experimento obteniendo de nuevo la recta A pero con el lecho recientemente fluidizado.

En la gráfica también se observan dos tramos bien diferenciados:

- Lecho fijo: La pérdida de carga aumenta linealmente con la velocidad superficial del gas. La pérdida de carga se determina mediante la ecuación de Ergun (3.17).
- Lecho fluidizado: una vez que el lecho esta fluidizado la pérdida de carga en el mismo se mantiene constante y es igual al peso por unidad de superficie de las partículas en suspensión del lecho:

$$\Delta p = \frac{mg}{A}$$

Para obtener la pérdida de carga consideraremos un lecho en el que se produce un gradiente de presión uniforme. La teoría desarrollada por Kozeny (1927) [9], y Carman (1937) [10], esta basada en obtener la equivalencia entre el paso del flujo entre los recovecos de lecho y el flujo de gas alrededor de una esfera que tenga una superficie y volumen equivalente.

Cuando un fluido pasa por un tubo, el coeficiente de fricción y el número de Reynolds del flujo es:

$$C_f = \frac{2\tau_0}{\rho u_m^2} \quad (3.1)$$

$$Re = \frac{\rho u_m d_H}{\mu} \quad (3.2)$$

Siendo τ_0 el esfuerzo tangencial en la pared, ρ y μ la densidad y viscosidad del fluido, u_m es la velocidad media en el paso y d_H es el diámetro hidráulico del mismo.

En la figura 3.2 se muestra la relación entre C_f y Re para un tubo, y similarmente la relación entre f y Re' para un lecho de esferas.

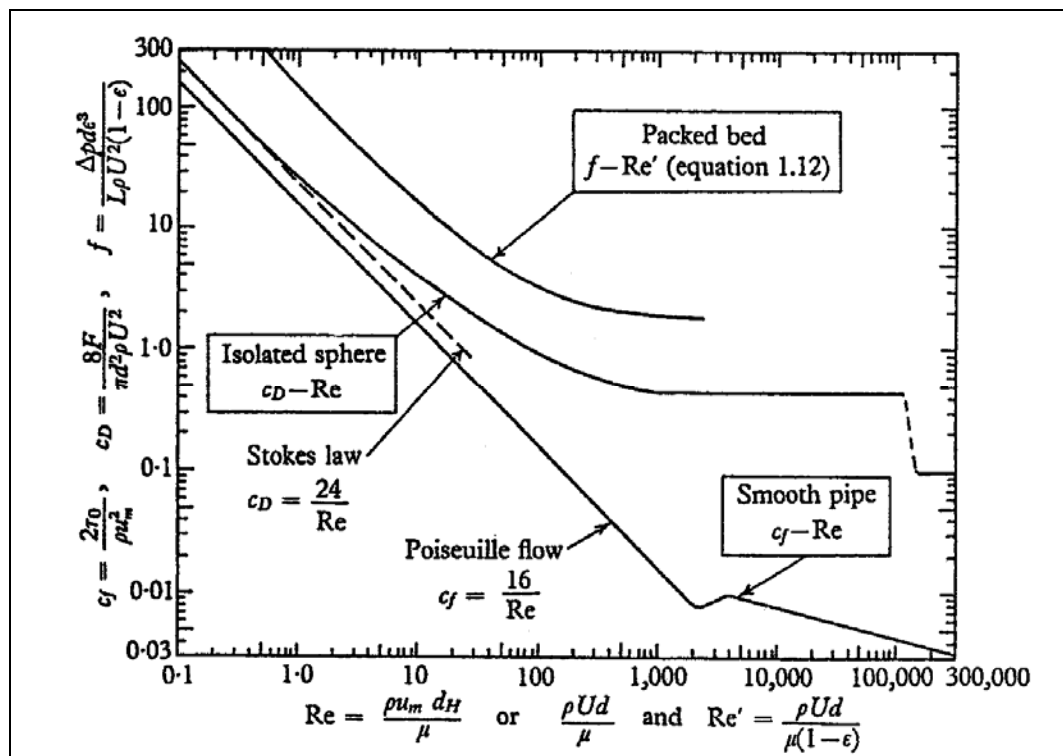


Figura 3.2. Relaciones entre pérdida de carga y el flujo para un tubo liso, una esfera, y un lecho. [2]

En la figura 3.3 se muestra una sección de paso para un flujo que sería equivalente en términos de pérdida de carga al paso de un fluido a través de un lecho de partículas. El paso tiene una sección A_m , una longitud L , y está inclinado un ángulo λ respecto al gradiente de presión del flujo principal.

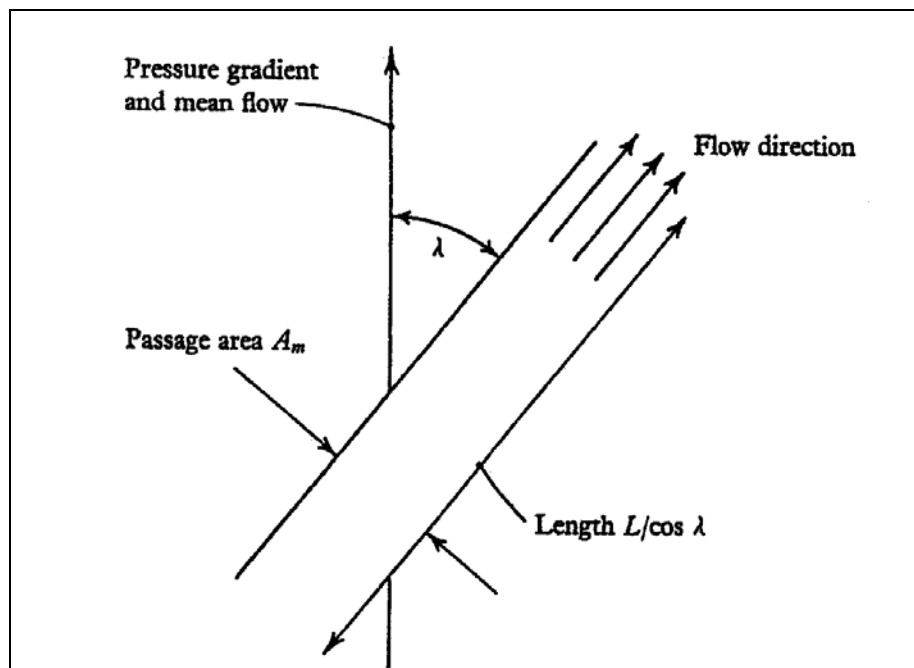


Figura 3.3. Paso inclinado con la misma resistencia al flujo que un lecho fluido. [2]



El volumen del paso es igual al volumen de vacío entre las partículas, por lo tanto:

$$\varepsilon_0 L = \frac{LA_m}{\cos \lambda} \Rightarrow \varepsilon_0 = \frac{A_m}{\cos \lambda} \quad (3.3)$$

El diámetro hidráulico del paso:

$$d_H = \frac{4A_m}{l} \quad (3.4)$$

Suponemos que el área de la pared de paso es igual a la superficie de las partículas, siendo a la superficie por unidad de volumen del paquete:

$$\frac{Ll}{\cos \lambda} = La$$

Por lo tanto usando (3.3) y (3.4), obtenemos el diámetro hidráulico de los espacios del paquete:

$$d_H = \frac{4A_m}{l} = \frac{4\varepsilon_0}{a} \quad (3.5)$$

La velocidad del flujo mostrado en la figura 3.3 es:

$$u_m A_m = U \quad (3.6)$$

Donde U es la velocidad superficial del gas y por tanto la velocidad media por unidad de sección del paquete es:

$$u_m = \frac{U}{\varepsilon_0 \cos \lambda} \quad (3.7)$$

El flujo es causado por la diferencia de presión por unidad de longitud del lecho ($\Delta p/L$), que actúa en la dirección mostrada en la figura 3.3. El gradiente de presiones ocasiona un esfuerzo tangencial τ_0 en toda la pared de paso:

$$\tau_0 = \frac{\Delta p A_m \cos \lambda}{Ll} = \frac{\Delta p \varepsilon_0 \cos \lambda}{La} \quad (3.8)$$

Sustituyendo (3.7) y (3.8) en (3.1) podemos obtener el coeficiente de fricción para un determinado paquete:



$$C_f = \frac{2\Delta p}{\rho U^2 L} \left(\frac{\varepsilon_0^3 \cos^3 \lambda}{a} \right) \quad (3.9)$$

Igualmente, sustituyendo (3.5) y (3.7) en (3.3) obtenemos el número de Reynolds para un determinado paquete:

$$\text{Re} = \frac{\rho U}{\mu} \left(\frac{4}{a \cos \lambda} \right) \quad (3.10)$$

Para bajos números de Reynolds, la ecuación de Poiseuille para el flujo de línea de corriente en un tubo (Prandtl 1952):

$$C_f = \frac{16}{\text{Re}} \quad (3.11)$$

Por lo tanto sustituyendo (3.9) y (3.10) en (3.11):

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{2\mu U a^2}{\varepsilon_0^3 \cos^2 \lambda} \quad (3.12)$$

En particular, para un lecho que contiene N esferas de diámetro d, por unidad de volumen:

$$a = \pi d^2 N$$

$$1 - \varepsilon_0 = \frac{1}{6} N \pi d^3$$

Con lo cual obtenemos:

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon_0)}{d} \quad (3.13)$$

Por lo tanto de (3.12):

$$\frac{\Delta p}{L} = \left[\frac{72}{\cos^2 \lambda} \right] \frac{\mu U (1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3 d^2} \quad (3.14)$$

Para esferas, Carman (1956) [11], proporciona un valor λ para (3.14) entre 48° y 51°, los cuales son razonables para una inclinación media entre las líneas de corriente y la dirección principal del flujo.

Para números del Reynolds mayores, varios investigadores han usado las ecuaciones (3.9) y (3.10). Ergun (1952) [12], usó los mismos grupos adimensionales f y Re' para



deducir una ecuación que relacionara la pérdida de carga a través del lecho y la velocidad del gas fluidizante:

$$f = \frac{\Delta p d \varepsilon_0^3}{L \rho U^2 (1 - \varepsilon_0)} \quad (3.15)$$

$$Re' = \frac{\rho U d}{\mu (1 - \varepsilon_0)} \quad (3.16)$$

Donde d se puede obtener con (3.13), y es el diámetro de una esfera que tiene la misma superficie por unidad de volumen que el lecho de partículas. En la figura 3.2 se puede observar la correlación de Ergun entre f y Re' :

$$f = \frac{150}{Re'} + 1.75 \quad (3.17)$$

Sustituyendo el valor de Re' y f obtenemos la ecuación de Ergun:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu U}{d^2} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} + 1.75 \frac{\rho U^2}{d} \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \quad (3.18)$$

El primer término predomina a bajos números de Reynolds ($Re < 10$), cuando el flujo es laminar. A éste régimen se obtiene el mismo resultado que con la correlación de Carman (3.14). Para números de Reynolds mayores ($Re > 2000$), cuando el flujo es turbulento el segundo término es el predominante.

3.2. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN.

El problema de determinar U_{mf} es esencialmente el problema de encontrar el flujo que produce una caída de presión en el lecho igual a su peso por unidad de sección.

La principal dificultad en la predicción de U_{mf} es conocer el valor de la fracción de vacío cuando el lecho está fluidizado. Suponiendo que el lecho está compuesto por esferas uniformes que toman el modo cúbico de paquete cuando comienza la fluidización:

$$\varepsilon_0 = \frac{6 - \pi}{6} \quad (3.19)$$

Es una aproximación correcta ya que se ha observado que el valor de ε_0 se encuentra en un rango de 0.4-0.5 en la fluidización de partículas esféricas de tamaño uniforme (Leva 1959 [13]; Zenz 1957 [14]).



Asumiendo que $\varepsilon_0=0.476$, y sustituyendo en (3.14) con un valor de $\frac{72}{\cos^2 \lambda} = 180$ (valor medio proporcionado por Carman), obtenemos:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{459 \mu U}{d^2} \quad (3.20)$$

En la fluidización incipiente la caída de presión es suficiente para soportar el peso de las partículas en una sección unidad, y entonces:

$$\frac{\Delta p}{L} = (\rho_s - \rho)g(1 - \varepsilon_0) \quad (3.21)$$

Donde ρ_s es la densidad del material de las partículas. Combinando (3.20) y (3.21), con $\varepsilon_0=0.476$, obtenemos:

$$U_{mf} = 0,00114 g d^2 (\rho_s - \rho) / \mu \quad (3.22)$$

Leva (1959) [13], siguió un proceso semejante pero utilizó valores experimentales para el valor de la fracción de vacío, obteniendo:

$$U_{mf} = [0,0007 \text{Re}_{mf}^{-0,063}] g d^2 (\rho_s - \rho) / \mu \quad (3.23)$$

El término entre corchetes se obtiene directamente de datos empíricos obtenidos en fluidización incipiente. Este termino es del mismo orden que el coeficiente 0,00114 (3.22) ya que Re_{mf} puede tomar valores de $10^{-8} - 10^2$, y por lo tanto $\text{Re}_{mf}^{-0,063} \cong 1$. La única diferencia que puede existir entre las dos correlaciones es que en (3.22) se ha tomado un valor fijo $\varepsilon_0=0.476$, que puede ser mayor que el tomado en (3.23).

Otros investigadores han obtenido otras correlaciones semejantes, diferenciándose únicamente en la forma de obtener ε_0 .

4. BURBUJAS EN LECHOS FLUIDOS.



Muchas propiedades características de los lechos fluidos gas-sólido son dominadas por el comportamiento de las burbujas, por lo tanto el conocimiento del comportamiento de las mismas es de vital importancia para el desarrollo y diseño de operación en lechos fluidos.

Las fluctuaciones de presión causadas por el paso de las burbujas en el interior del lecho como medida indirecta nos pueden proporcionar el tamaño de las mismas y su velocidad. Además la medida de la presión puede aportarnos una idea de en qué régimen de fluidización estamos operando.

Las series temporales de presión son una superposición de fluctuaciones locales causadas por el movimiento de las burbujas a lo largo de lecho y por lo tanto por la turbulencia del gas. Las ondas de presión viajan a lo largo del lecho en ambas direcciones desde su punto de origen. Su amplitud decae linealmente con la distancia de su origen a la superficie del lecho pero no en sentido contrario. Por lo tanto estas fluctuaciones de presión pueden ser medidas en el plenum del lecho. Al contrario que estas fluctuaciones, las burbujas generan sólo fluctuaciones locales de presión que no pueden ser detectadas en el plenum [7].

4.1. FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DE BURBUJAS.

La formación de burbujas en el lecho es análoga a la formación de las mismas en un líquido de baja densidad. Cuando introducimos aire en un líquido a través de un orificio, se forma un tren de burbujas que desplazan el líquido y suben hacia la superficie del mismo si su densidad es inferior. Cuando llegan a la superficie estas burbujas estallan provocando fluctuaciones de presión. El ascenso de las burbujas produce una serie de fluctuaciones de presión locales debidas al paso de las mismas, su coalescencia, y el efecto pared.

Lo sucedido en un lecho de partículas es semejante, insuflamos aire a través del distribuidor formando burbujas que ascienden por el lecho provocando fluctuaciones de presión a su paso. La formación de burbujas ocurre con el lecho fluidizado y en su fluidización. A continuación se exponen una serie de semejanzas con el burbujeo en un líquido de baja viscosidad:

- La forma de las burbujas pequeñas es esférica, esférico-casquillo cuando son más grandes y aplanadas y torcidas cuando son mucho más grandes.
- Las burbujas pequeñas ascienden lentamente y las burbujas grandes ascienden rápidamente.
- Un tren de burbujas puede coalescer para formar burbujas de mayor tamaño. La interacción de las burbujas proporciona una velocidad de ascensión diferente, aunque la misma dirección.

- El efecto de las paredes actúa en la misma dirección que la velocidad de ascenso de las burbujas.
- El exceso de gas inyectado en los lechos fluidos pasa a través del lecho en forma de burbujas.

Los estudios realizados han demostrado que un lecho fluido en condiciones de mínima fluidización puede ser tratado como un líquido de baja densidad. Cuando la velocidad del gas está por encima de la de mínima fluidización, el exceso de aire pasa a través del lecho en forma de burbujas que ascienden de forma similar al ascenso de burbujas de aire en un líquido de baja densidad. El valor de la fracción de vacío de la fase densa del lecho (la fase que no son burbujas), es aproximadamente igual al valor de la fracción de vacío en condiciones de mínima fluidización ε_{mf} . A altas velocidades el ascenso de las burbujas produce grandes fluctuaciones y arrastre de sólidos.

4.2. PARÁMETROS DE LAS BURBUJAS.

Al igual que en un líquido, la velocidad de ascenso de una burbuja grande y esférica en un lecho se puede describir mediante la expresión de Davies y Taylor (1950) [15]:

$$u_{br} = \frac{2}{3}(gR_n)^{1/2} \quad (4.1)$$

Donde R_n es el radio de curvatura de la burbuja.

La velocidad de las burbujas ha sido medida experimentalmente por Davidson y posteriormente otros investigadores obteniendo una base de valores que posteriormente Clift y Grace (1985) [16], utilizaron para ofrecer la siguiente expresión:

$$u_{br} = 0.711(gd_b)^{1/2} \quad (4.2)$$

Donde d_b es el diámetro de una burbuja esférica que tiene el mismo volumen que la burbuja estudiada. Los efectos de pared no son considerados en esta expresión.

En nuestro caso utilizaremos el modelo aportado por Darton (1977) [21], en el que se puede calcular el diámetro de la burbuja a partir de la velocidad del gas, la velocidad mínima de fluidización, la superficie libre del distribuidor, y la distancia al mismo.

$$d_b = (0.54(U - U_{mf})^{0.4}) \cdot (z + 4\sqrt{A_0})^{0.8} \cdot (g^{-0.2}) \quad (4.3)$$

Donde z es la distancia del punto de medida al distribuidor, y A_0 es la superficie libre del distribuidor:

$$A_0 = A / Nr \quad (4.4)$$

Donde A es el área transversal de lecho y Nr el número de orificios del distribuidor.

Para velocidades elevadas del gas, las burbujas a su salida del distribuidor obtienen un tamaño elevado y coalescen. En este caso la expresión vista anteriormente no es válida y necesitamos una que nos proporcione el diámetro de la burbuja a la salida del distribuidor. Para ello utilizaremos la siguiente expresión:

$$d_{b0} = \frac{2.78}{g} (U - U_{mf})^2 \quad \text{para } d_{b0} > l_{or} \quad [1] \quad (4.5)$$

Donde l_{or} es la distancia entre centros de los orificios del distribuidor.

Cuando la velocidad del gas es suficientemente elevada se puede producir slugging (apartado 2.1). A través de la expresión 4.3 o 4.5 podemos determinar el diámetro de las burbujas y compararlo con el diámetro del lecho para comprobar la aparición de slugs, ya que podemos decir que existe slugging cuando $d_b / D > 0.6$.

4.3. MODELO DE DAVIDSON.

El primer modelo fiable, de gran utilidad y reconocida potencia para el análisis de la presión en el movimiento de las burbujas en su ascenso por el lecho es el modelo de Davidson (1963) [2]. Debido a su sencillez y fácil aplicación se han sucedido diferentes análisis y correlaciones del mismo. El modelo de Davidson se apoya en los siguientes postulados:

- 1.- Una burbuja de gas no contiene sólidos y posee forma esférica en tres dimensiones y cilíndrica en dos.
- 2.- Cuando la burbuja asciende, las partículas se echan a un lado como un fluido incompresible, no viscoso y de densidad $\rho_s(1 - \varepsilon_{mf})$.
- 3.- la velocidad relativa entre el gas y el sólido debe satisfacer la ley de Darcy. Para la dirección x :

$$(u_{gas} - u_{solido})_x = -K \frac{\partial p}{\partial x}$$

Además, se imponen las siguientes condiciones de contorno:

- Lejos de la burbuja existe un gradiente de presión determinado por la ecuación:

$$\frac{\Delta p}{L} = (\rho_s - \rho)g(1 - \varepsilon_0) \quad (3.21)$$

- La presión en la burbuja es constante.

Con los postulados enunciados y las condiciones de contorno impuestas es suficiente para describir el flujo de sólidos y gas así como la distribución de presión alrededor de la burbuja.

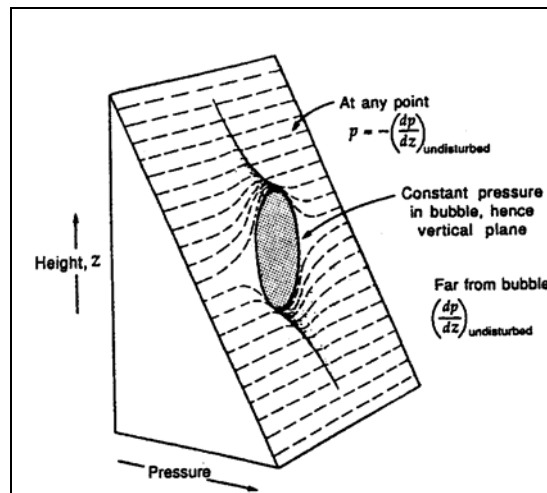


Figura 4.1. Representación de la distribución de presión en 3D alrededor de una burbuja aplicando el modelo de Davidson. [1]

La distribución de presión la podemos observar en la figura 4.1, en la que podemos apreciar que la presión en la zona inferior de la burbuja es menor que a su alrededor. En la figura 4.2 se muestra la distribución de presión en 2D producida por una burbuja a su paso por un punto del lecho para diferentes métodos aplicados y experimentalmente.

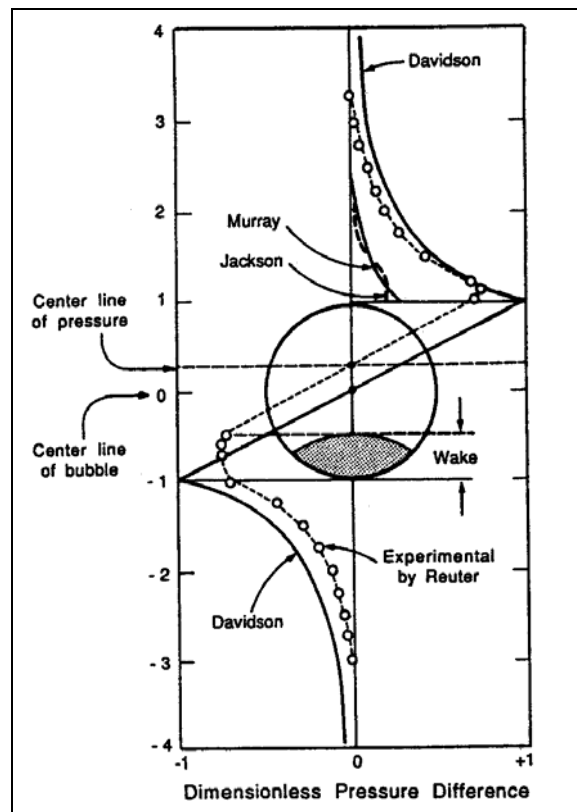


Figura 4.2. Comparación de la distribución de presión alrededor de una burbuja con la medida experimental de Reuter. [1]

En la figura anterior podemos observar adimensionalizados los diferentes perfiles de fluctuación de presión producidos por el paso de una burbuja por un punto del lecho. Davidson modeló los resultados experimentales construyendo una correlación en la que la presión aumenta y disminuye de forma cúbica en función del radio de la burbuja. En la zona central del paso de la burbuja, la presión varía linealmente de un extremo a otro.

Las ecuaciones que definen el modelo de Davidson son las siguientes:

$$\text{- Para } y < -r_b \Rightarrow \Delta p = (P_{med} / s) r_b^3 y^{\frac{3}{5}} \quad (4.6)$$

$$\text{- Para } -r_b < y < r_b \Rightarrow \Delta p = (P_{med} / s) y \quad (4.7)$$

$$\text{- Para } y > r_b \Rightarrow \Delta p = (P_{med} / s) r_b^3 y^{\frac{3}{5}} \quad (4.8)$$

Donde P_{med} es la presión media en el punto de medida por el que pasa la burbuja, s es el intervalo en el que aplicamos el modelo de Davidson, r_b es el radio de la burbuja.

En la figura 4.2 también observamos que el centro de la línea de presión en los valores experimentales se encuentra desplazado con respecto al centro de la burbuja debido a que la burbuja arrastra detrás de ella una nube de partículas puesto que su forma no es completamente esférica. En la figura 4.3 se muestra la forma normal de una burbuja donde se puede apreciar la nube de partículas que la sigue.

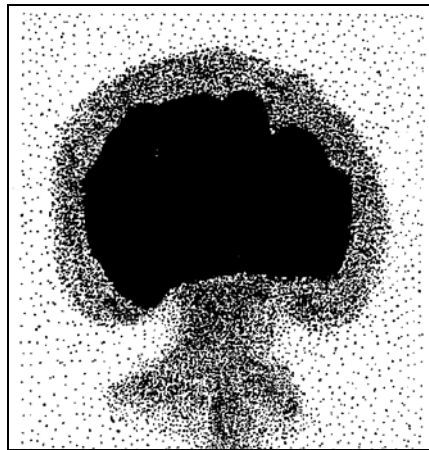


Figura 4.3. Dibujo de una burbuja en ascenso. [1]

5. CARACTERIZACION DE PARTICULAS.

Cuando un lecho de sólidos es suspendido en una corriente ascendente, el lecho se puede comportar de varias maneras: se fluidiza suavemente en ausencia de burbujas, burbujeando, o como un choro. El comportamiento del lecho depende en gran parte del tipo de sólidos utilizados. En este capítulo se muestra como influye el tipo de partículas y se ofrece una clasificación universal muy utilizada en la actualidad por laboratorios.

5.1. PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN.

En el capítulo 3 se mostraron algunos principios para considerar la interacción de las partículas en el lecho. Cuando las partículas son esféricas podemos medirlas sencillamente y calcular sus parámetros geométricos. En la realidad nunca tendremos partículas esféricas de ahí la dificultad que presenta poder desarrollar un modelo sencillo.

Definiremos los principales parámetros de los sólidos:

- Densidad de las partículas, ρ_s : La densidad se define como la masa de una partícula m_p entre el volumen que ocupa la misma, o volumen que ve el fluido cuando rodea a la partícula incluyendo todas las imperfecciones y poros. Dicho volumen se denomina volumen hidrodinámico V_h .

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_h} \quad (5.1)$$

- Densidad aparente de lecho, ρ_b : En nuestro estudio utilizaremos esta densidad puesto que es más sencilla de obtener. Se obtiene como la masa total de las partículas contenidas en el lecho m_b , entre el volumen que ocupan incluyendo el espacio entre las mismas, denominado volumen aparente V_{ap} .

$$V_{ap} = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (5.2)$$

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (5.3)$$

Donde D es el diámetro del lecho y L es la altura de lecho que ocupa el volumen V_{ap} .

- Fracción de vacío del lecho, ε_0 : La fracción de vacío del lecho representa la relación de volumen entre los espacios entre las partículas y el volumen aparente del lecho.

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \quad (5.4)$$

Por lo tanto:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_0) \rho_s \quad (5.5)$$

Para poder obtener las propiedades de las partículas debemos de conocer ε_0 ó ρ_s .

5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN.

Según el tipo de partículas utilizadas las propiedades del lecho así como su operación varían. En 1973 Geldart [17], clasificó las partículas en cuatro grandes grupos según sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. Actualmente es utilizada esta clasificación en diversos campos de tecnología de partículas.

Si fluidizamos partículas con aire en condiciones ambiente y tenemos una región del lecho con fluidización no burbujeante a velocidad mínima de fluidización, seguida de una fluidización burbujeante a medida que se incrementa la velocidad, las partículas que presentan este tipo de comportamiento se engloban en el denominado “grupo A”.

Si las partículas sólo ofrecen un comportamiento burbujeante tanto a velocidad mínima de fluidización como por encima de la misma, pertenecen al “grupo B”.

En el otro extremo tenemos el “grupo C”, que lo componen las partículas muy finas y cohesivas que no se pueden fluidizar en el sentido más estricto; y el “grupo D”, formado por partículas grandes que producen los lechos de “chorro” al ser fluidizadas.

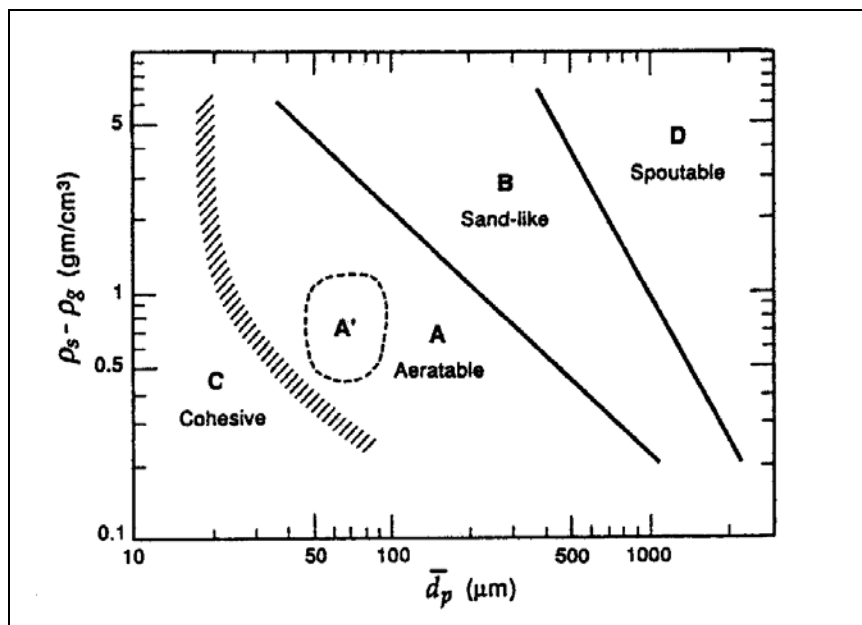


Figura 3.1. Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño. [1]

El estado de fluidización burbujeante es el que se encuentra comúnmente en los sistemas de uso comercial. Por lo tanto, en las aplicaciones comerciales encontraremos normalmente partículas del grupo A, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo, U_{mb} .

Las propiedades de fluidización de las partículas en aire se pueden predecir si se clasifican en uno de los cuatro grupos. Debemos resaltar que condiciones de temperatura y presión superiores a la ambiental pueden suponer que un tipo de partícula en concreto muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece.

También podemos clasificar las partículas según su U_{mb} respecto a su U_{mf} ya que en ciertas aplicaciones es necesario conocer el comportamiento frente al burbujeo de las partículas:

- En las partículas del grupo A, donde $U_{mb} > U_{mf}$, las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja. Esto hace que la fluidización sea de buena calidad y suave.
- En las partículas de los grupos B y D, con $U_{mb} = U_{mf}$, las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado. Con lo cual, la fluidización es de peor calidad y llevando asociada grandes fluctuaciones de presión.
- En el Grupo C, las fuerzas entre partículas son mayores comparadas con las fuerzas de inercia. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria para ser totalmente soportadas, no consiguiendo la fluidización. No aparecen burbujas sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

Cuando el tamaño de las burbujas es aproximadamente 0.6 veces del diámetro del lecho, podemos decir que se produce la formación de slugs de gas. Debemos evitar el Slugging ya que aparecen grandes fluctuaciones de presión que producen muchas vibraciones en la instalación. Este efecto no ocurre si la velocidad superficial del gas es relativamente moderada y el tamaño del lecho es relativamente grande comparado con el tamaño de las burbujas.

En la Tabla 5.1 se resume la clasificación de Geldart, de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.



	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización. Muestran un rango de no burbujeo.	Comienzo del burbujeo a U_{mf}	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Sólidos bastos
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, Cemento	Grava, Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Tabla 5.1. Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.

6. METODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN.

En este capítulo se exponen los diferentes métodos experimentales que vamos a utilizar en la caracterización de nuestro lecho. Todas las medidas necesarias se van a basar en la toma de presión en el lecho y se trataran de diferente manera para determinar ciertas características del mismo.

6.1. PÉRDIDA DE CARGA EN EL LECHO.

Tal y como se expone en el capítulo 3, los lechos fluidos gas-sólido presentan un comportamiento típico que se caracteriza por la relación entre pérdida de carga en el lecho y velocidad superficial del gas. En la figura 6.1 se representa dicho comportamiento.

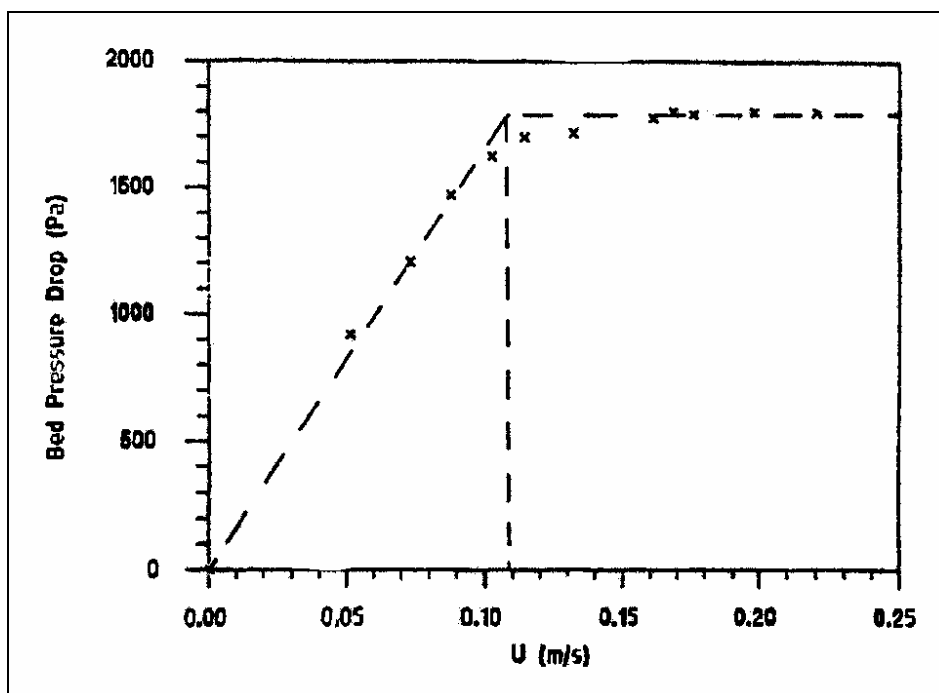


Figura 6.1. Pérdida de carga en el lecho en función de la velocidad superficial del gas. [5]

En la figura se muestra la pérdida de carga en el lecho como función de la velocidad superficial del gas. Podemos observar que a medida que aumenta la velocidad superficial del gas también aumenta linealmente la pérdida de carga en el lecho en el tramo de lecho fijo. Una vez alcanzada una determinada velocidad superficial del gas, la pérdida de carga en el lecho no aumenta más y se mantiene constante lo cual se denomina lecho fluidizado. La velocidad a la que ocurre la transición a lecho fluidizado es la velocidad mínima de fluidización.

Experimentalmente podemos obtener la gráfica llevando nuestra instalación desde altas velocidades del gas pasando por la velocidad de mínima fluidización, y por lo tanto defluidizando el lecho, hasta que $U=0$. La toma de medidas se hará en sentido descendente.

Cabe destacar que con este método la principal ventaja es poder obtener la velocidad mínima de fluidización simplemente midiendo la pérdida de carga en el lecho y por lo tanto no es necesario conocer las propiedades de las partículas. Por otra parte el principal inconveniente es la necesidad de defluidizar el lecho, lo que impide poder obtener la velocidad mínima de fluidización durante la operación del mismo.

En conclusión, aplicaremos este método midiendo la pérdida de carga producida en el lecho de partículas variando la velocidad superficial del gas. Una vez obtenidos todos los valores los graficamos para obtener una gráfica semejante a la de la figura 6.1 y determinaremos así la velocidad mínima de fluidización.

6.2. VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACIÓN UTILIZANDO LA MEDIDA DE FLUCTUACIONES DE PRESION.

Es posible obtener la velocidad mínima de fluidización experimentalmente sin interrumpir el proceso usando la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

En 1974 Verloop y Herejes [18] fueron los primeros en utilizar el estudio de las fluctuaciones de presión en lechos burbujeantes. En 1985 Puncochar obtuvo la manera de hallar la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), en condiciones de operación, a través de la medida de las fluctuaciones de presión. Por lo tanto, podemos obtener U_{mf} evitando defluidizar el lecho fluido tal y como era necesario en el método visto anteriormente (Davidson y Harrison 1963, apartado anterior). Por otra parte, no es necesario conocer las características de las partículas del lecho.

Analizando las fluctuaciones de presión producidas en el lecho, se observó que la desviación típica de las mismas era función casi lineal de la velocidad superficial del gas (Puncochar et al. 1985):

$$\sigma_p = A + BU \quad (6.1)$$

Siendo U la velocidad superficial del gas, B la pendiente de la recta, y A una constante. Las fluctuaciones de presión en el lecho son producidas por varios fenómenos como la creación de burbujas, el ascenso de las mismas por el lecho, y su erupción cuando llegan a la superficie. Por lo tanto, para partículas de los grupos B y D de la clasificación de Geldart en las que la velocidad mínima de fluidización coincide con la velocidad de mínimo burbujeo es posible determinar la velocidad mínima de fluidización como la velocidad del gas a la cual la desviación típica de las fluctuaciones de presión es mayor de cero, es decir, a la velocidad que empiezan la aparición de las burbujas y por lo tanto de las fluctuaciones de presión.

Con lo cual, obteniendo U_{mf} cuando $\sigma_p = 0$:

$$U_{mf} = -\frac{A}{B} \quad (6.2)$$

Podemos analizar el método atendiendo al concepto de “Energía mecánica del movimiento vibratorio de partículas”. La energía mecánica media de las partículas en un lecho de volumen unidad a una velocidad superficial del gas por encima de la de mínima fluidización se puede expresar:

$$\overline{E}(U) = \overline{E}(U_{mf}) + W \quad (6.3)$$

Donde W es la contribución de energía debida a las heterogeneidades del movimiento fluido.

Furukawa y Ohmae (1958) [19], determinaron que la energía mecánica media de las partículas es proporcional a la velocidad superficial del gas:

$$\overline{E}(U) = k_1 U \quad (6.4)$$

Siendo k_1 un parámetro que depende de las propiedades de las partículas y la temperatura. Para regímenes en los que todas las partículas se mueven en fase con el fluido y viceversa, y por tanto a la misma frecuencia, podemos suponer que la energía debida a las irregularidades depende de desviación típica de las fluctuaciones de presión:

$$W = k_2 \sigma_p \quad (6.5)$$

Donde k_2 es otro parámetro dependiente de las condiciones de operación.

Combinando las Ecuaciones (6.3), (6.4), (6.5), podemos obtener una interpretación física de la ecuación (6.1):

$$k_1 U = k_1 U_{mf} + k_2 \sigma_p ; \quad \sigma_p = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} + \frac{k_1}{k_2} U \quad \left\{ \begin{array}{l} B = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} \\ A = \frac{k_1}{k_2} \end{array} \right.$$

Como podemos observar, los parámetros intervinientes en la relación lineal de la velocidad superficial del gas y la desviación típica de las fluctuaciones de presión dependen directamente de las condiciones de operación y las características de las partículas.

Desde que Puncochar obtuvo la velocidad mínima de fluidización usando un lecho fluido circular con un distribuidor con orificios de 0,8mm de diámetro y un área libre de 2%, muchos otros investigadores han validado el método utilizándolo en diferentes configuraciones de lechos. Una vez validado el método, los esfuerzos se han encaminado hacia dos aspectos diferentes:

- Determinar el número mínimo de medidas de presión requeridas para obtener valores aceptables de desviación estándar.
- Validez de la toma de medidas de presión en el plenum para evitar problemas físicos como la obstrucción de las sondas o la erosión de las mismas.

La base para determinar el tamaño de la muestra no se encuentra reflejada en ningún estudio. Los investigadores han trabajado con diferentes tamaños de muestra sobre lechos con semejantes condiciones de funcionamiento obteniendo un tamaño mínimo de la muestra para poder validar los resultados del ensayo.

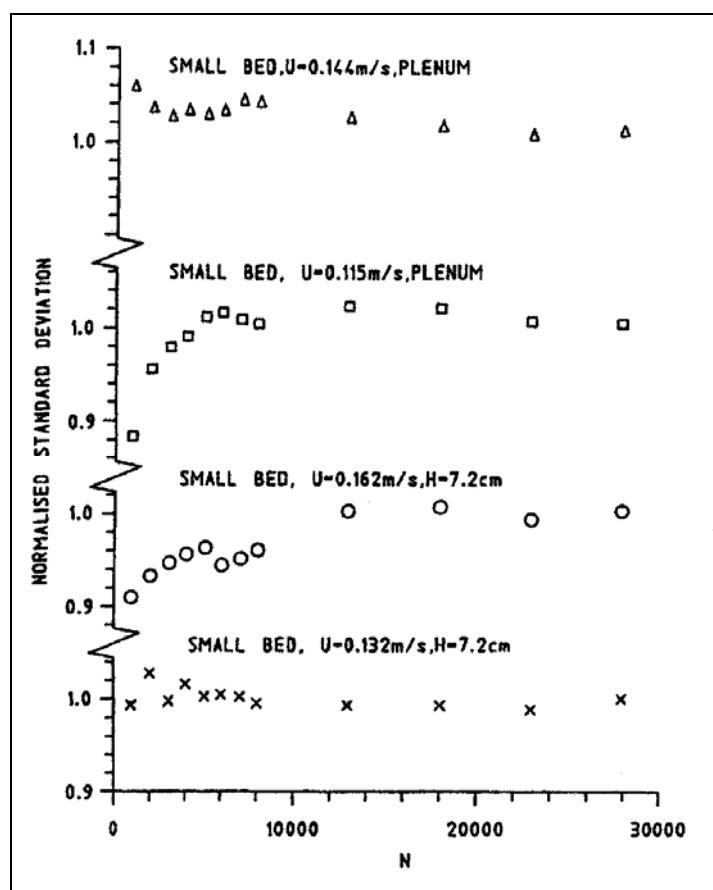


Figura 6.2. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función del número de medidas en un lecho a pequeña escala. [5]

En la figura 6.2 (Wilkinson, 1995 [5]), se muestra el efecto del aumento del número de medidas en la desviación estándar para dos localizaciones diferentes. En la figura podemos apreciar que hasta 1000 medidas el resultado puede variar significativamente con respecto al valor obtenido con series mayores. Para muestras de más de 10000 medidas, la variación entre las medias es aproximadamente $\pm 2\%$. Por lo tanto, según los diferentes experimentos realizados al respecto, debemos tomar un mínimo de 10000 medidas para aplicar este método con garantías.

Los experimentos realizados sobre la determinación del punto de medida de las fluctuaciones han validado la toma de medida de las fluctuaciones de presión en el plenum. En la figura 6.3 se muestran los resultados obtenidos para diferentes puntos de medida en el lecho. Como podemos apreciar en la figura, la medida de presión en el plenum ofrece resultados semejantes que en puntos situados en el lecho. Tomando medidas en el plenum evitaremos problemas de desgaste y obstrucción, lo cual ofrece una ventaja.

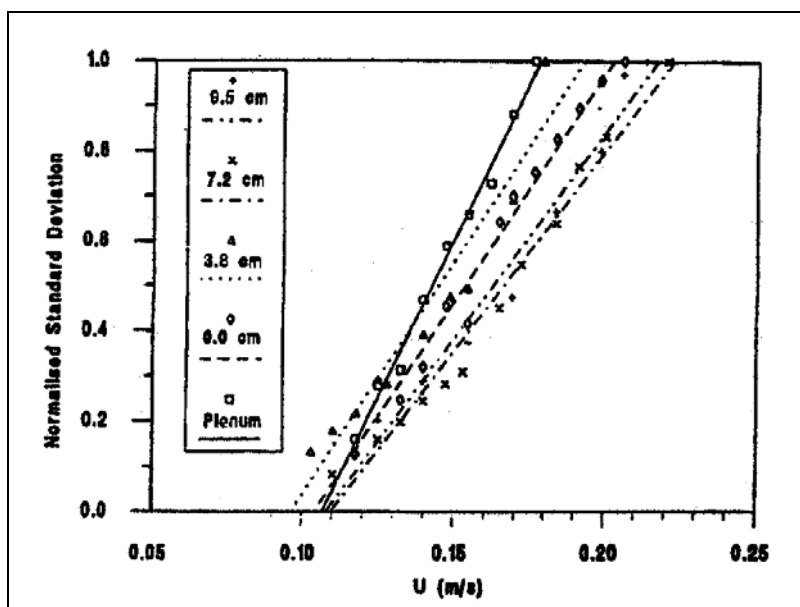


Figura 6.3. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función del número de medidas en un lecho a pequeña escala. [5]

6.3. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO.

El estudio de las series temporales de las fluctuaciones de presión ha sido utilizado en numerosos análisis de sistemas hidrodinámicos desde el último cuarto de siglo pasado. El análisis espectral es una potente herramienta para el análisis de presión. La densidad de potencia espectral (DPE), en la literatura “PSD”, proporciona una completa información sobre los fenómenos que ocurren el interior del lecho pudiendo conformar la caracterización del mismo. Existe una cierta complejidad en la obtención de la medida de presión dinámica ya que las fuentes que proporcionan fluctuaciones en el lecho son numerosas.



Tal y como se comento en el capítulo 4, las fluctuaciones son una superposición de fluctuaciones locales provocadas por el movimiento de las burbujas durante su ascenso en el lecho. Las ondas de presión viajan a lo largo del lecho en ambas direcciones desde su punto de origen y por lo tanto estas fluctuaciones de presión pueden ser medidas en el plenum del lecho.

A partir de las fluctuaciones de presión medidas para aplicar el método visto en el apartado anterior, podemos obtener la frecuencia característica del lecho y por lo tanto la frecuencia a la que ocurren los principales fenómenos del mismo. Para ello aplicaremos el desarrollo de Fourier sobre las series medidas obteniendo así las frecuencias de nuestro lecho.

7. INSTALACIÓN.

El estudio se desarrolla sobre una instalación experimental de laboratorio. La instalación consta de un lecho a pequeña escala de partículas preparado para su fluidización y un equipo de control y medida. En el trabajo realizado se ha llevado a cabo el desarrollo de la instalación, desde el diseño estructural de la columna que contiene las partículas de fluidización hasta el software necesario para la toma de medidas.

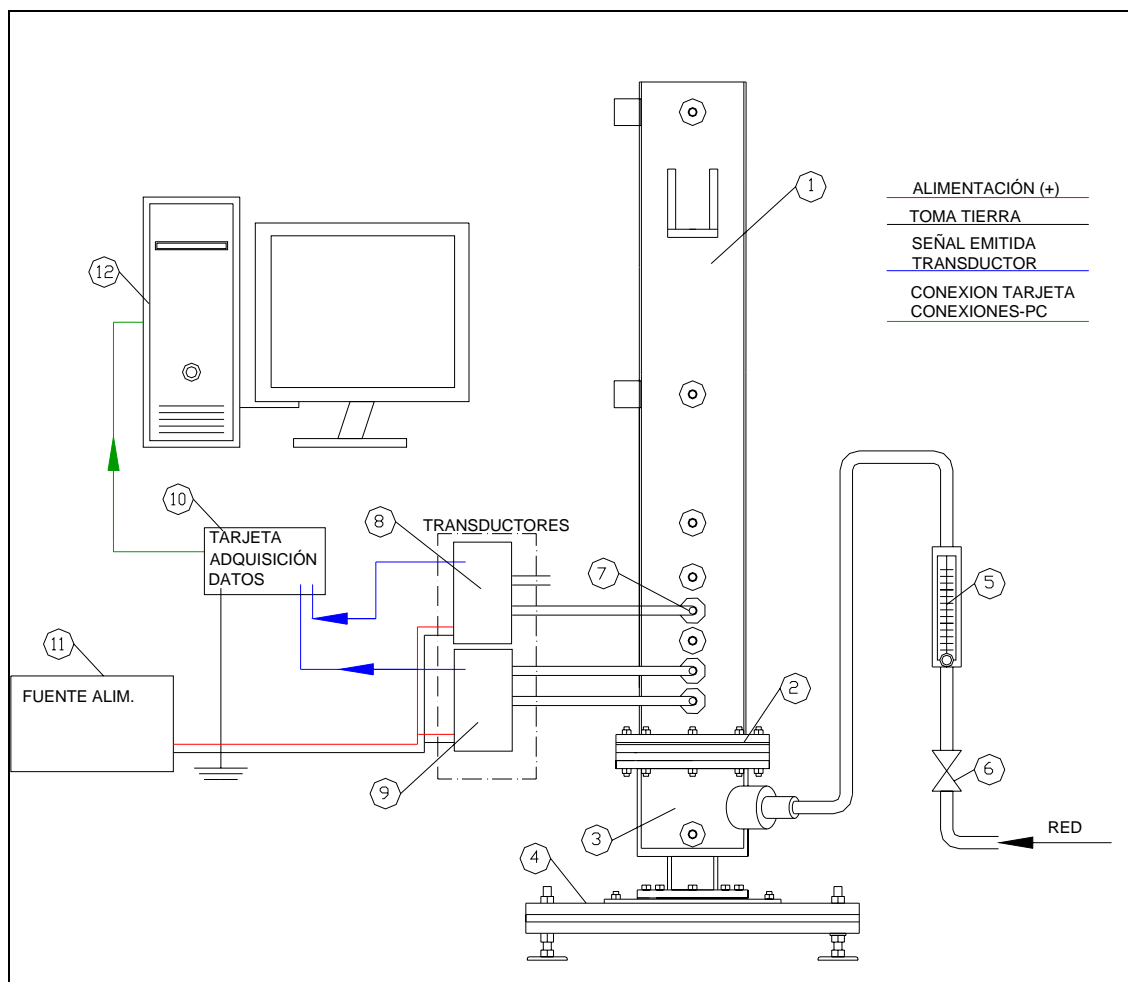


Figura 7.1. Esquema de la instalación. 1 Columna; 2 Distribuidor; 3 Plenum; 4 Plataforma sustentación; 5 Rotámetro; 6 Válvula reguladora de presión; 7 Sonda de presión; 8 Transductor medida presión manométrica; 9 Transductor medida presión diferencial; 10 Tarjeta adquisición de datos; 11 Fuente de alimentación; 12 PC almacenamiento y tratamiento de datos.

Podemos dividir la instalación en tres partes:

- *El lecho:* en este capítulo nos referiremos al lecho como el medio físico donde tiene lugar la fluidización. El lecho contiene todos los elementos necesarios para llevar a cabo la fluidización: columna, cámara de remanso (plenum), distribuidor, tomas para sensores, y debe ser robusto y estático para evitar vibraciones.

- *Gas y partículas de fluidización:* el sistema estudiado es de tipo gas-sólido.
- *Sistema de medidas y adquisición de datos:* en la columna se han instalado sondas de presión que miden las fluctuaciones que posteriormente se transformaran en una señal de tensión mediante transductores de presión. Las señales de tensión se transfieren mediante una tarjeta de adquisición de datos a un PC donde son almacenadas para su posterior tratamiento.

En los siguientes apartados se detallan las diferentes partes así como todos los elementos que componen cada una de ellas. En la figura 7.1 se puede observar un esquema de la instalación.

7.1. DESCRIPCIÓN DEL LECHO.

En la figura 7.2 se muestra una fotografía del lecho.



Figura 7.2. Lecho donde se realiza el estudio.

Para describir los diferentes elementos que conforman el lecho seguiremos el orden en el que el flujo de gas los atraviesa.

- Plenum: es la parte del lecho por la que introducimos el gas. La entrada del gas se realiza de forma perpendicular al lecho y por lo tanto es necesario la utilización de un plenum como cámara de remanso en la cual estabilizamos el gas. El plenum esta formado por un cilindro de metacrilato transparente de 0.154m de diámetro interior y 0.31m de altura. En la parte inferior del mismo se sitúa una brida para anclarlo a la plataforma base del lecho. En su pared alberga una toma para la entrada del gas y otra para acoplar una sonda.
- Distribuidor: si continuamos el flujo del gas nos encontramos con el distribuidor, el cual se encarga de que el flujo de gas sea lo más uniforme posible. Para ello hacemos pasar el gas por una matriz de orificios a través de los cuales se conseguirá un perfil uniforme gracias al efecto que tiene la diferente pérdida de carga dependiendo de la velocidad. El distribuidor lo componen dos discos perforados colocados uno sobre otro. El primer disco que atraviesa el gas, lado del plenum, esta fabricado en aluminio y sus orificios tienen un diámetro de 12mm. El segundo disco esta fabricado en metacrilato transparente y sus orificios tienen un diámetro de 3mm. Ambos discos tienen una matriz de 170 orificios con una separación entre los mismos de 2.62cm, y se montan haciendo coincidir ambas matrices. Entre los dos discos se ha instalado una maya de 400 μ m para evitar el escape de partículas hacia el plenum.
- Columna: el flujo de gas llega a través del distribuidor a la columna, donde se encuentran las partículas. Una vez allí ocurrirán los fenómenos detallados en capítulos anteriores. La columna esta constituida por un tubo de metacrilato transparente de 0.150m de diámetro y 1.025m de altura. Su pared esta preparada para alojar las sondas de presión. El extremo superior de la columna se encuentra abierto, por lo que las condiciones de operación son a temperatura y presión ambiente. Su altura es suficientemente grande para evitar el transporte de partículas al exterior.

Las diferentes partes se unen gracias a que tanto la columna como el plenum están contruidos con unas bridas iguales en los extremos de unión. Entre las bridas se sitúan los dos discos y la maya que forman el distribuidor. Los discos tienen el mismo diámetro que las bridas permitiendo sujetar con tornillos pasantes todo el conjunto en bloque. Las bridas y los discos se sellan con juntas de polímero para evitar posibles fugas de gas.

El lecho se sustenta con una base a la que se une a través del plenum. La base esta contruida con perfiles cuadrados de aluminio de 0.265m de lado.

Las diferentes tomas ubicadas en la pared de la columna para albergar las sondas de presión se encuentran colocadas a una distancia sobre el distribuidor de 0.062m,



0.107m, 0.152m, 0.197m, 0.247m, 0.328m y 0.520m respectivamente. En la columna existen otras tomas que no utilizaremos para nuestro estudio y que taparemos con tapones metálicos.

Los planos estructurales del lecho se encuentran en el anexo 4.

7.2. CARACTERISTICAS DEL GAS Y PARTÍCULAS DE FLUIDIZACION.

El tipo de sistema objeto del estudio es gas-sólido. En este apartado describiremos las características de ambos componentes.

El gas utilizado para la fluidización del lecho es aire a presión que obtenemos de la red de aire comprimido de la Universidad. La presión del gas la podemos variar con una válvula reguladora de presión y el caudal que utilizamos para nuestra instalación lo regulamos mediante un rotámetro. El rango de regulación del rotámetro es 0-1400l/min. Para aislar completamente la instalación contamos con una llave de paso general.

Las propiedades del aire a presión y temperatura ambiente son:

- $\rho = 1.204 \text{ kg} / \text{m}^3$
- $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Para nuestro estudio de caracterización hidrodinámica utilizaremos como partículas para fluidización arena de sílice o comúnmente conocida como “arena de río”. Este tipo de partículas pertenece al grupo B de la clasificación de Geldart. Por lo tanto se caracterizan por un comienzo de burbujeo al inicio de la fluidización, una expansión del lecho moderada y sin chorros, y un crecimiento de burbujas cuyo límite es el diámetro de la columna.

Es difícil determinar el tamaño de las partículas ya que existe una cierta dispersión de tamaños. En la figura 7.3 se muestra una microscopía de las partículas. Aunque el propio microscopio con el que se ha realizado la microscopía aporta una escala de referencia, la determinación del tamaño característico de las partículas utilizadas lo obtendremos aplicando una técnica de tratamiento digital de imágenes. Esta técnica se basa en analizar gráficamente la superficie proyectada ocupada por las partículas sobre un fondo de diferente color. Mediante una función sencilla incorporada en Matlab podemos a través de un fichero TIF (también soporta otro tipo de fotografías), que contiene la microscopía, determinar mediante esta técnica el tamaño característico. Matlab divide la fotografía en píxeles que dibujará de blanco o negro dependiendo de si es una partícula o es el fondo de la microscopía. Posteriormente nos permite seleccionar cualquier partícula y nos ofrece sus características atendiendo al tamaño de la microscopía y el número de píxeles que ocupa.

El tamaño obtenido mediante la aplicación de la cronografía es $d_p = 733 \mu\text{m}$. Otra opción podría haber sido obtener el tamaño característico simplemente realizando la media del tamaño de todas las partículas aplicando la escala incorporada en las figuras.

Gracias a que las partículas poseen una superficie lisa y sin poros, podemos emplear un picnómetro para determinar el valor de la densidad de partícula. La densidad ofrecida por el picnómetro $\rho_s=2651 \text{ g/cm}^3$.

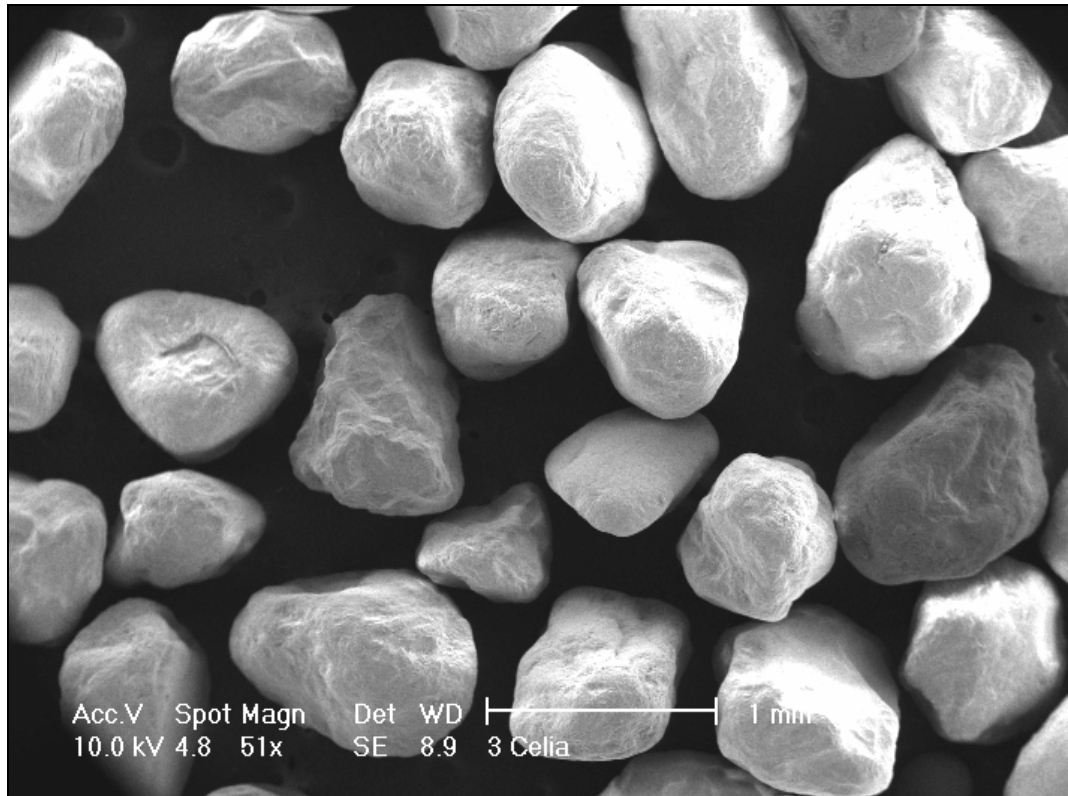


Figura 7.3. Microscopía de arena de sílice.

Para nuestro experimento, utilizaremos una altura de lecho igual a 1.5 veces el diámetro del mismo: $\frac{L}{D} = 1.5$.

Por lo tanto, una vez conocida la densidad de partícula podemos obtener el resto de sus propiedades (capítulo 5). Midiendo directamente en el lecho:

- $V_{ap} = 3975 \text{ cm}^3$ ($L/D = 1.5$)
- $m_b = 6.30 \text{ kg}$ para ($L/D = 1.5$)

Aplicando la Ecuación (5.3), obtenemos la densidad aparente del lecho:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \Rightarrow \rho_b = 1585 \text{ g/cm}^3$$

Aplicando la ecuación (5.5), calculamos la porción de vacío en el lecho:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_0) \rho_s \Rightarrow \varepsilon_0 = 0.402$$

Las características de las partículas así como las técnicas utilizadas se encuentran detalladas en el anexo 1.

7.3. SISTEMA DE MEDIDA Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

La necesidad de tomar medidas de presión a alta velocidad para recoger todas las fluctuaciones de presión, nos obliga a tener un sistema de toma de medidas y almacenamiento capaz de ello. Para experimentos en los que se requiera de una adquisición de datos de este tipo, lo más utilizado por su sencillez y bajo coste es un PC equipado con una tarjeta de adquisición de datos.

Las fluctuaciones de presión son recogidas por las sondas y transformadas en una señal de tensión mediante transductores de presión. Esta señal es captada y transformada digitalmente por medio de una tarjeta de adquisición de datos.

El control de la tarjeta se realiza mediante un software de programación gráfico que reconozca la tarjeta y nos permita mediante un sencillo programa manejarla para captar información así como almacenarla. El software de programación usado fue DASYLab.

Las características técnicas de cada componente se encuentran detalladas en el anexo 2.

7.3.1. SONDAS DE PRESION.

Las sondas de presión utilizadas están preparadas para ser alojadas en los soportes especiales de la pared de la columna y el plenum. Están formadas por un tubo de acero inoxidable de 2mm de diámetro interior montado sobre un racor macho de ¼ pulgadas NPT. Una vez montadas las sondas, estas quedan enrasadas con la pared interior de la columna o del plenum. Para evitar la obstrucción de las sondas éstas llevan incorporada una maya en la punta.

Las conexiones entre sondas y transductores se realizan mediante tubos de silicona de 4mm de diámetro interior.

7.3.2. TRANSDUCTORES.

Los transductores de presión empleados son de tipo piezoresistivo o piezoelectrico. Se encargan de transformar la fluctuación de presión en una señal eléctrica de tipo analógico. Se han empleado dos modelos de sensores diferentes según su rango de medida para tener mayor o menor precisión. La corriente continua de excitación necesaria para el funcionamiento de los sensores la obtenemos de una fuente de alimentación que poseemos en el laboratorio. Esta fuente también proporciona servicio a otros elementos de la instalación.

- **Transductor de presión modelo SETRA 267**

Disponemos de 3 transductores de ése modelo, cuyas características más relevantes se exponen en la siguiente tabla:

CARACTERISTICAS	SETRA 267-10''
Rango de medida: pulgadas H ₂ O (Pa)	0 – 10 (0 – 2500)
Tensión de entrada: V-DC	12 – 40
Tensión de salida: V-DC	0.05 – 5.05
Función de transducción (Pa)	$\Delta p = 500 \cdot V - 25$
Precisión: % sobre el fondo de escala	1

Tabla 7.1. Características del transductor modelo SETRA 267.

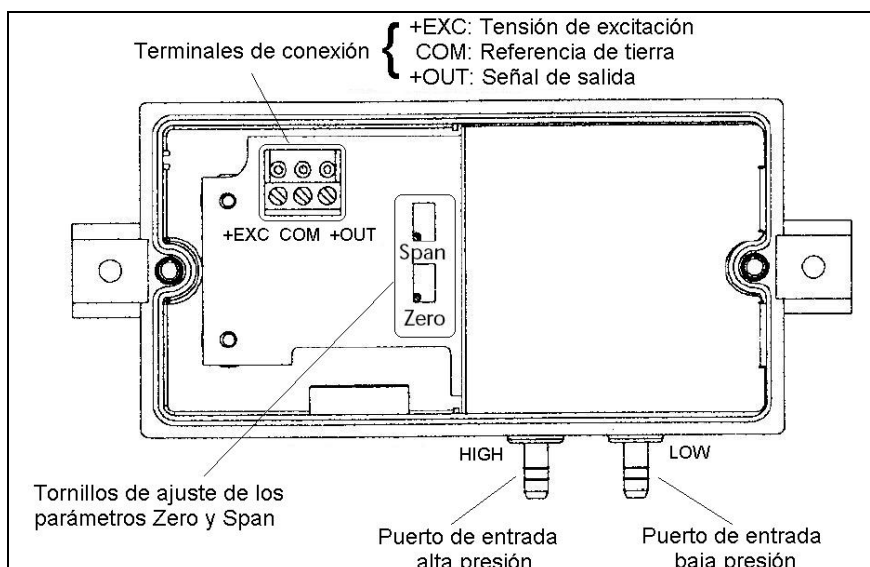


Figura 7.4. Esquema del transductor modelo SETRA 267-10''

En la figura 7.4 se muestra un esquema del transductor en el que se pueden observar las diferentes conexiones, y entradas y salidas necesarias para su funcionamiento. El transductor se alimenta con una tensión de 14 V de corriente continua.

- **Transductor modelo OMEGA PX 291-030W**

En la tabla 7.2 se muestran las características del transductor modelo Omega PX. A diferencia con el anterior transductor, su rango de medida es mucho mayor. Éste modelo lo utilizaremos en medidas en las que exista mayor diferencia de presión y el modelo anterior en medidas más finas con menor diferencia de presión. Disponemos de 2 unidades de este modelo.

CARACTERÍSTICAS	OMEGA PX 291-030W
Rango de medida: pulgadas H ₂ O (Pa)	0 – 30 (0 – 7500)
Tensión de entrada: V-DC	11 – 32
Tensión de salida: V-DC	0 – 5
Función de transducción (Pa)	$\Delta p = 1500 \cdot V$
Precisión: % sobre el fondo de escala	1

Tabla 7.2. Características del transductor modelo OMEGA PX 291-030W.

En la figura 7.5 se muestra un esquema del transductor en la que se pueden observar las diferentes conexiones. La tensión de alimentación al igual que en el modelo anterior es de 14 V de corriente continua.

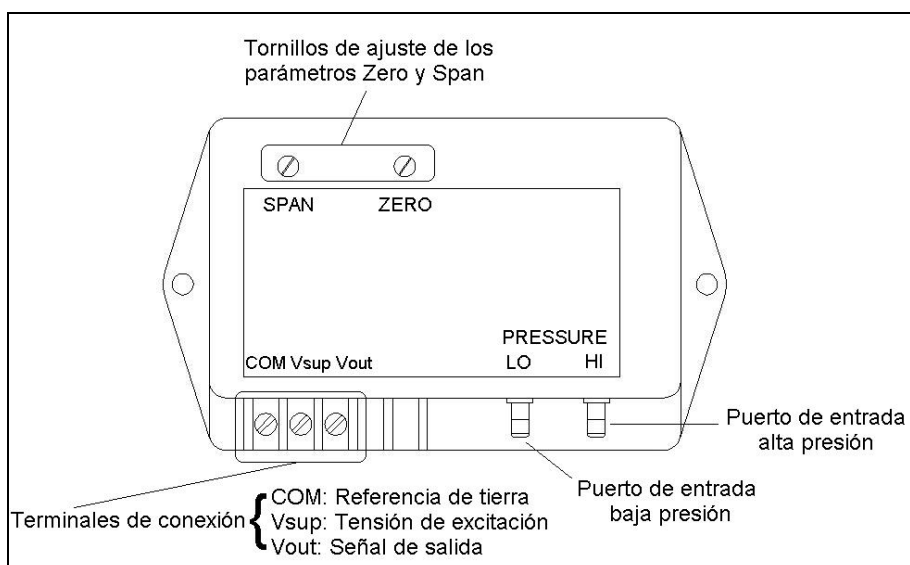


Figura 7.5. Esquema del transductor modelo OMEGA PX291-030W.

Como podemos apreciar, los transductores son muy semejantes exteriormente.

7.3.3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

La tarjeta de adquisición de datos será la encargada de transformar las señales de tensión emitidas por los transductores en señales digitales para su almacenamiento y tratamiento en un PC.

El fabricante de la tarjeta de adquisición de datos utilizada es ICP DAS y el modelo es PCI-1602F. La tarjeta esta preparada para su uso en un PC o en un equipo con ranuras de expansión bus PCI. Para hacer más sencillo y versátil el uso de la tarjeta, atendiendo a las diferentes conexiones para entradas-salidas y alimentación, ésta se apoya en una placa de conectores que podemos situar en el exterior del PC. El modelo de la placa de conectores es DB-1825 de ICP DAS. La placa de conectores esta preparada para soportar todas las entradas y salidas de la tarjeta:

- Entradas analógicas: la tarjeta cuenta con 32 canales de entrada analógicos configurables como 32 entradas referenciadas a tierra (single-ended), o 16 entradas diferenciales. La selección de la configuración se lleva a cabo mediante jumpers. La tarjeta cuenta con un conversor analógico-digital de 16 bits y frecuencia máxima de muestreo de 200 kHz. El rango de entrada en modo bipolar es de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2.5V$, o $\pm 1.25V$.
- Salidas analógicas: la tarjeta permite la salida de dos canales independientes de 12 bit de resolución. El rango de salida en modo bipolar es de $\pm 5V$, o $\pm 10V$.
- Entradas/salidas digitales: la tarjeta presenta dos puertos, uno de salida y otro de entrada, de 16 bits compatibles TTL.
- Temporizador: la tarjeta dispone de tres canales para señales de temporizador de 16 bits, con una frecuencia máxima de entrada de 8 MHz.
- Especificaciones generales: la tarjeta requiere una tensión de 5V y una corriente de 1200mA. La conexión a la placa de conectores requiere un cable de 37 pins.

En la figura 7.6 podemos apreciar un esquema de la tarjeta de adquisición de datos, y en la figura 7.7 se muestra la tarjeta de conectores y su conexión a la tarjeta de adquisición.

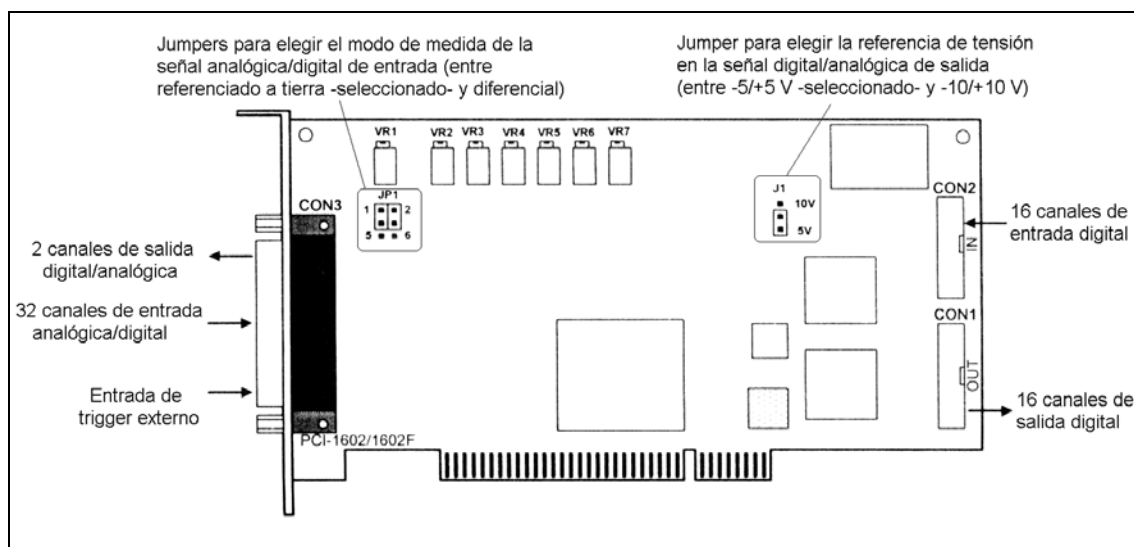


Figura 7.6. Esquema tarjeta adquisición de datos ICP DAS PCI-1602F.

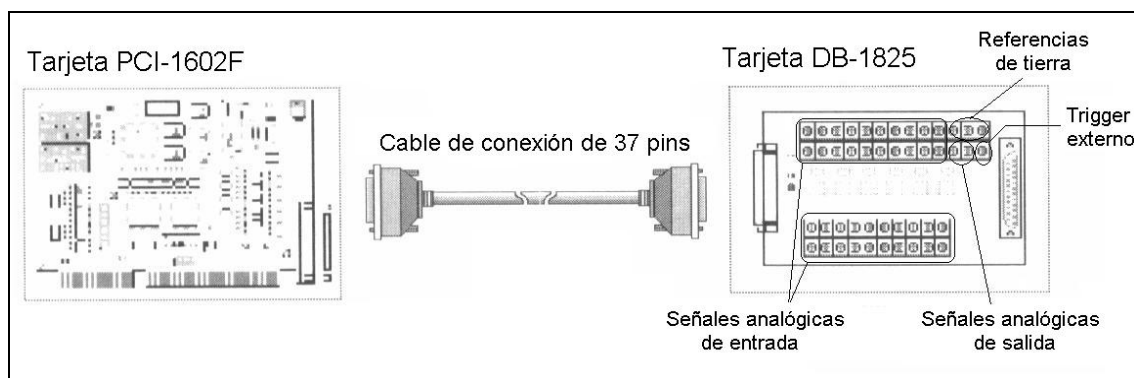


Figura 7.7. Esquema conexión placa de conectores DB-1825 de ICP DAS y tarjeta adquisición datos.

7.3.4. PROGRAMACION.

Para que la tarjeta de adquisición capture las medidas y podamos almacenarlas, es necesario un software para que el PC que sea capaz de controlarla.

Para la captura y tratamiento de la señal proporcionada por los transductores se emplea el software de programación gráfica DASYLab que utiliza un lenguaje de programación gráfico mediante el cual se ha realizado un sencillo programa para capturar la información tal y como nos la proporcionan los transductores, es decir, en lugar de transformar la señal emitida en valores de presión, se guardarán directamente los valores de tensión para posteriormente tratarlos. Las series de datos se almacenan en un fichero con formato ASCII.

El lenguaje de programación gráfica nos permite crear un programa a partir de módulos funcionales que debemos interconectar según el flujo de información. En la figura 7.8 se muestra un diagrama de bloques con el flujo de la información en DASYLab.

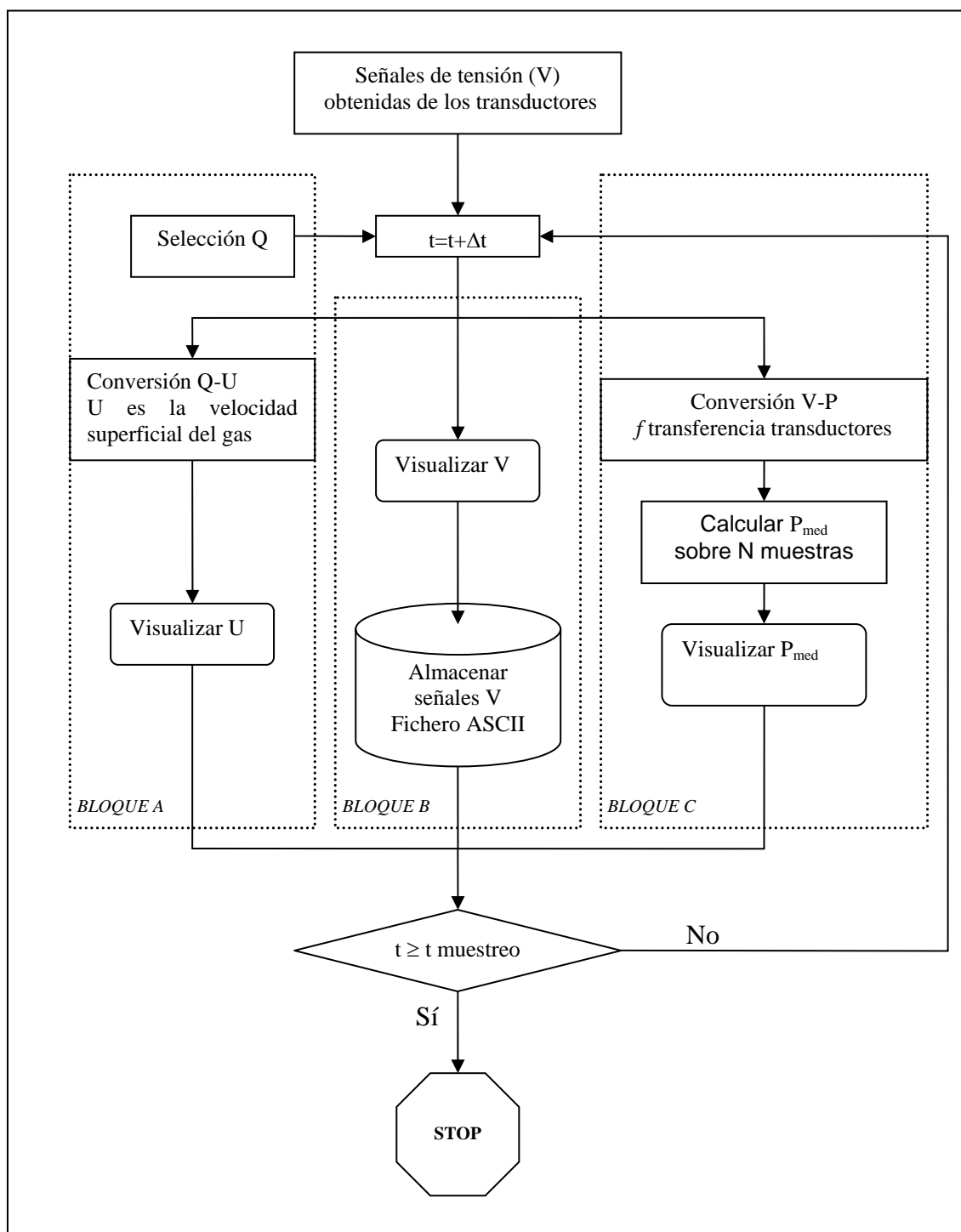


Figura 7.8. Diagrama flujo información DASYLab..

En la figura 7.9 podemos ver el programa en DASYLab que implementa el flujo visto en la figura anterior.

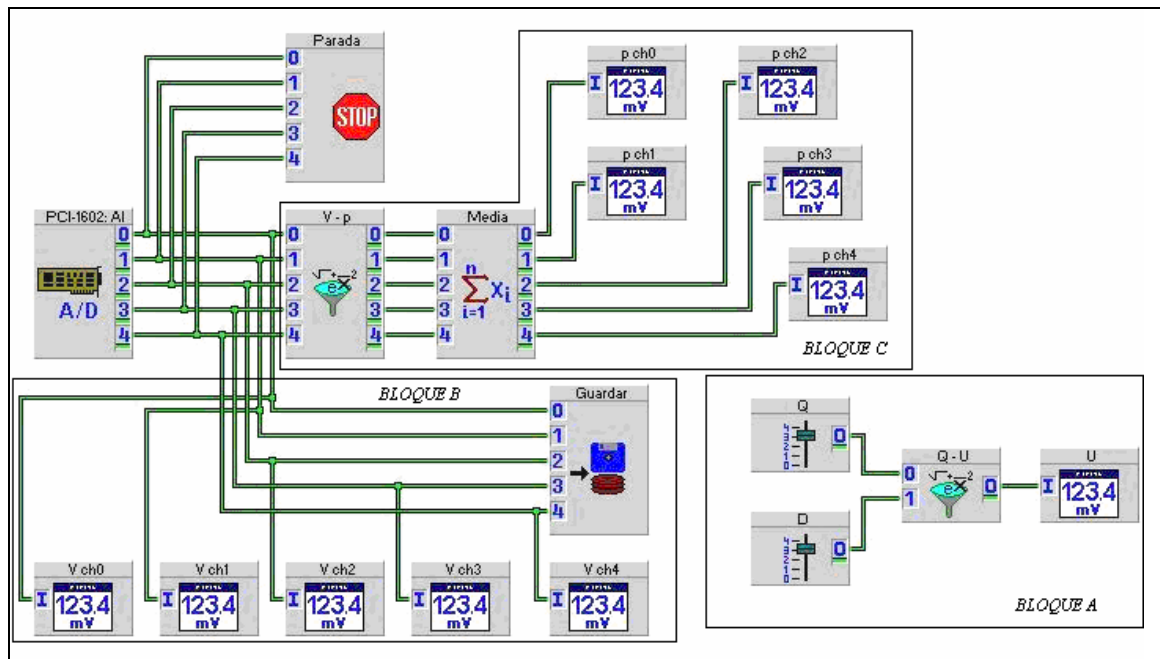


Figura 7.9. Programa adquisición de datos de DASYLab.

Como podemos observar, cada modulo representa una función y el camino de la información esta representado por las líneas que los une. El programa está hecho para soportar el tratamiento de cinco entradas analógicas. En ambas figuras se identifican los tres bloques principales de tratamiento de la información:

- Bloque A: nos proporciona la velocidad superficial del gas a partir de la introducción del caudal del mismo y el diámetro del lecho.
- Bloque B: nos muestra por pantalla los valores de tensión que nos proporcionan los transductores y almacena los mismos en un fichero ASCII. El fichero ASCII crea una matriz con 6 columnas con los datos medidos. En la primera columna almacena el tiempo de cada dato y en las sucesivas los valores de tensión de los mismos.
- Bloque C: convierte los valores de tensión que proporcionan los transductores en valores de presión y los muestra por pantalla.

El módulo de entrada de la información (figura 7.10(a)), representa a la tarjeta de adquisición de datos. En el otro extremo, el módulo de parada “STOP”, debemos de configurarlo para determinar en que momento debe de dejar de tomar medidas (figura 7.10(b)). El módulo “STOP” hace que el programa entre en funcionamiento o no. Cuando entra en funcionamiento, la información fluye por todos los conectores y llega a todos los módulos haciendo estos su función. Cuando interrumpe el funcionamiento cumpliendo la condición que impongamos todos los módulos dejan de funcionar al mismo tiempo.

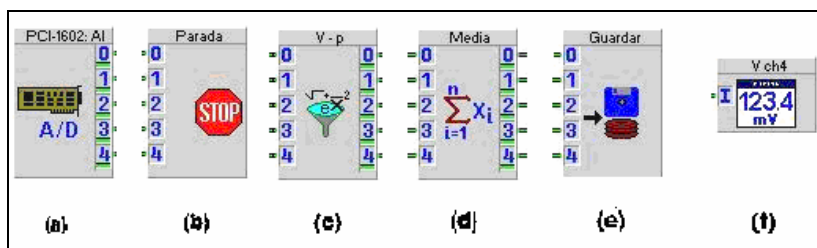


Figura 7.10. Módulos funcionales de DASYLab. (a) Módulo de entrada; (b) Módulo STOP; (c) Módulo de operaciones matemáticas; (d) Módulo estadístico: media; (e) Módulo de almacenaje; (f) Módulo de presentación por pantalla.

Debemos configurar todos los módulos intervinientes para que cada uno de ellos desarrolle la función deseada y con los resultados esperados.

Cuando arrancamos el programa los datos se presentan en diferentes ventanas sobre la misma pantalla de programación. DASYLab permite la opción de crear una presentación, pero esta no es interactiva, es decir, sólo podemos visualizar datos y resultados. Con lo cual es más versátil emplear el programa visualizando los datos sobre el mismo. En la figura 7.11 se muestra la visión del programa en funcionamiento.

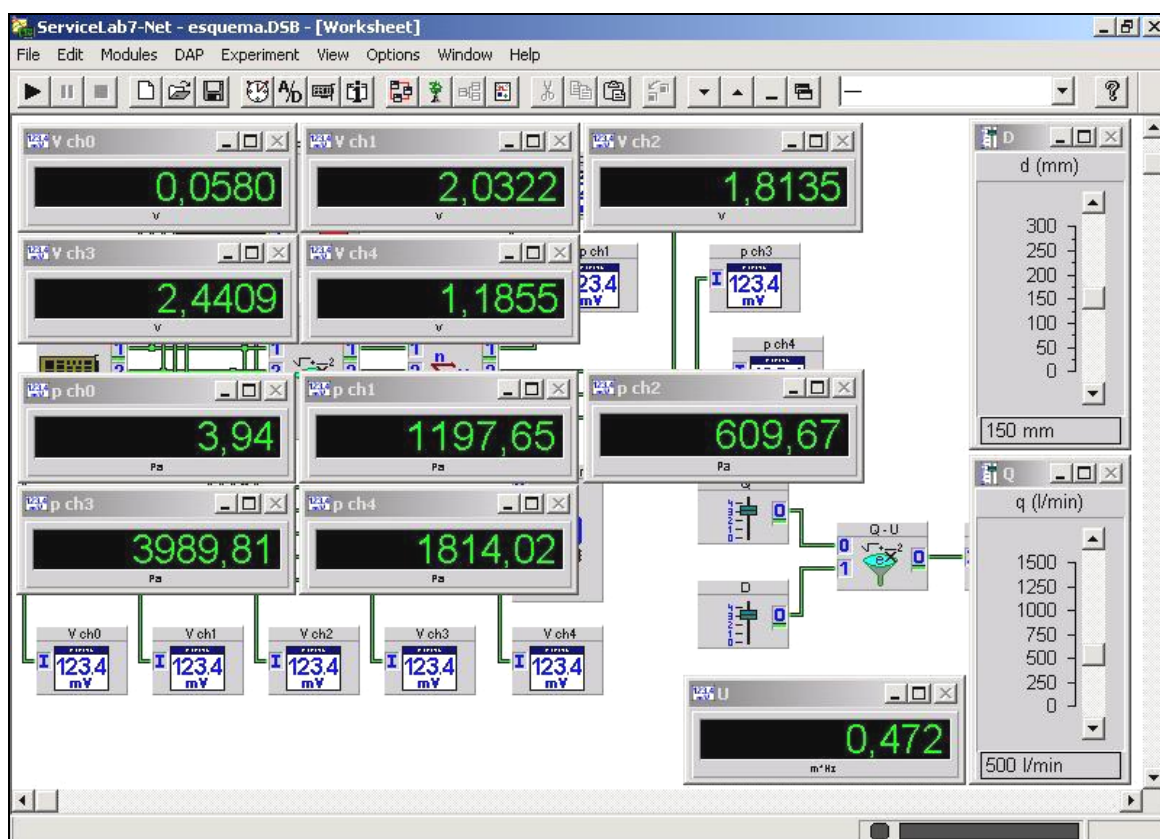


Figura 7.11. Presentación datos programa DASYLab en funcionamiento.

Como podemos observar en la figura 7.11, las ventanas que presentan los datos tienen el mismo nombre que el módulo encargado de mostrarlos por pantalla. Es muy útil observar los valores de tensión o presión por pantalla para poder controlar continuamente la instalación y detectar posibles problemas y fallos en la misma.

7.3.5. CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN.

El sistema establecido de toma de medidas se puede catalogar de semiautomático, ya que el software utilizado sólo nos permite capturar los datos para su tratamiento pero no nos permite controlar la instalación.

Los transductores se conectan a la tarjeta de adquisición de datos mediante la tarjeta de conectores exterior DB-1825. La conexión se realiza mediante cable unipolar de cobre de 1.2mm de diámetro y 1.5m de longitud. En el laboratorio no existen otros sistemas eléctricos como motores, o cualquier otra fuente de ruido que funcione cuando tomamos medidas en nuestra instalación. Además la señal de salida de los transductores es muy grande (0-5V), comparada con el ruido que pudiera interferir en nuestra instalación (~mV). Con lo cual no necesitaremos ningún tipo de acondicionamiento para nuestra señal.

Las entradas a la tarjeta son de tipo analógico y utilizaremos la referencia a tierra en lugar de la diferencial. La referencia a tierra comparará un valor de tensión que proporciona el transductor con el valor de referencia que será la tierra (0V). Por lo tanto, los transductores también deben estar referenciados a tierra para poder obtener resultados coherentes. Con lo cual, tanto los transductores como la tarjeta los referenciaremos a la tierra de la fuente de alimentación. La tarjeta la debemos configurar mediante los jumpers para admitir entradas referenciadas a tierra.

Una vez llevada a cabo la instalación para poder usar la toma de medidas con referencia a tierra también tenemos que configurar el software. En DASyLab debemos configurar el tipo de entrada para que nuestro programa pueda tratarla correctamente. Al mismo tiempo tenemos que configurar la frecuencia de muestreo, que fijaremos en 200Hz, aproximadamente 20 veces superior a la frecuencia característica de los fenómenos que ocurren en el interior del lecho (<10Hz). De esta manera podremos apreciar con toda exactitud las fluctuaciones que producen los diferentes fenómenos.

Por otra parte, el muestreo lo valoraremos en tiempo, es decir, estableceremos muestreos de 5 minutos (300sg), lo equivalente a 60000 valores de presión en cada muestreo. Esta cantidad de valores es suficiente para poder utilizar con garantías el método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión visto en el capítulo 6.

Todos los valores medidos en cada muestreo son almacenados en un fichero para su posterior tratamiento. El fichero tendrá formato ASCII ya que su versatilidad es mayor para poder posteriormente exportarlo a otros sistemas para su tratamiento.



Si volvemos a la parte de la instalación que engloba al lecho, el gas, y las partículas de fluidización; esta parte es controlada solamente por el caudal de aire que introducimos en el lecho. Mediante la válvula reguladora de presión establecemos 2bar de presión para todos los experimentos, variando únicamente el caudal. Por lo tanto, para operar la instalación debemos en primer lugar establecer las condiciones de caudal de aire deseado y posteriormente tomar medidas en el lecho mediante el sistema de toma de medidas y almacenamiento. Esta operación la tendremos que repetir para cada toma de medidas cuando variamos las condiciones de operación.

Por último debemos resaltar que para variar los puntos de toma de presión en el lecho basta con cambiar los tubos de silicona a la sonda deseada y tener en cuenta en la toma de medidas a qué canal o entrada corresponden los datos de la nueva ubicación del sensor. En el programa todas las entradas así como los cables que conducen a cada una de ellas se encuentran numerados para permitir cambiar posiciones y transductores evitando modificar las conexiones de la tarjeta.

8. TOMA DE MEDIDAS Y CÁLCULOS.

A lo largo del capítulo se expondrá el procedimiento seguido para tomar las medidas así como los cálculos aplicados para su tratamiento.

Para la caracterización del lecho se han tomado tanto medidas de presión absolutas como diferenciales en diversos puntos del mismo. Para poder tomar diferentes medidas para un mismo régimen de funcionamiento del lecho y así poder compararlas en las mismas condiciones se han instalado diferentes sondas y se ha configurado el sistema de medidas para poder soportarlas todas.

8.1. MEDIDAS DE PRESIÓN EN LA PARED DEL LECHO.

Para poder caracterizar el lecho y tratar las medidas obtenidas en iguales condiciones se ha realizado un montaje que permite tomar tanto medidas manométricas como diferenciales. En la siguiente figura se muestra el montaje (montaje 1), realizado para la toma de medidas.

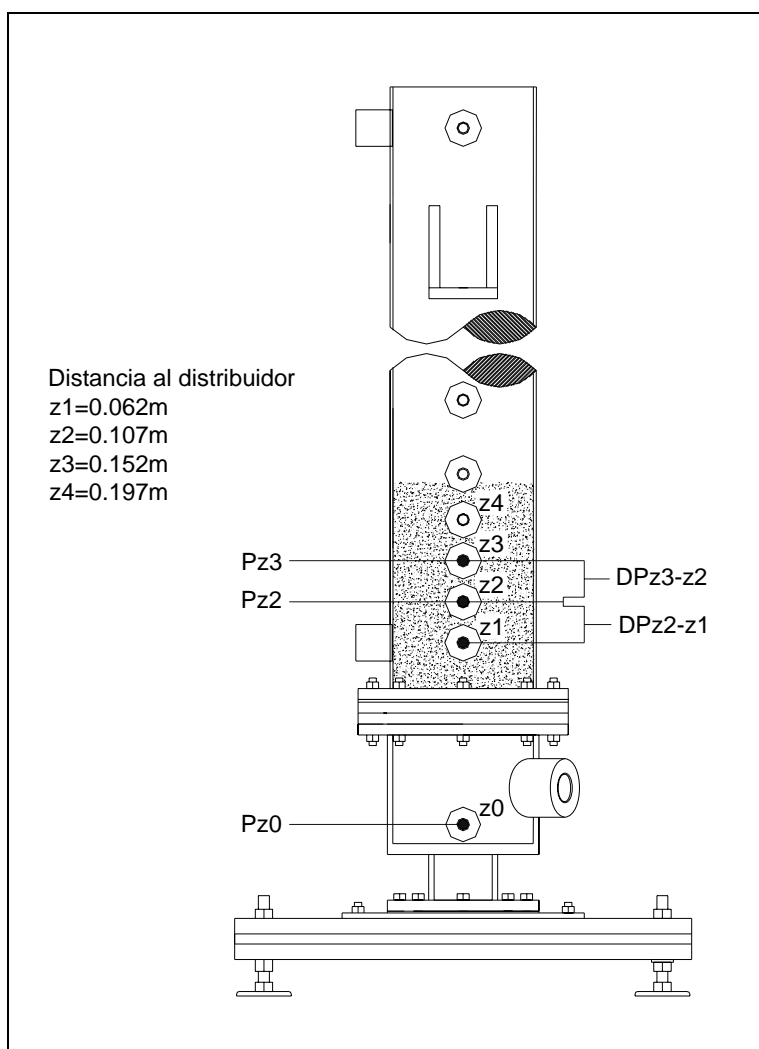


Figura 8.1. Esquema montaje de toma de medidas. Montaje 1.

Como podemos comprobar, se han tomado 3 puntos donde se ha medido la de presión manométrica y 3 puntos entre los cuales se ha medido la presión diferencial. En la tabla 8.1 se expone la referencia de las tomas de presión con el modelo de transductor utilizado para cada una de ellas y el tipo de medida tomado.

PUNTO DE MEDIDA	TRANSDUCTOR	MEDIDA
z0	OMEGA PX 291-030W	Absoluta
z2	OMEGA PX 291-030W	Absoluta
z3	SETRA 267	Absoluta
z3-z2	SETRA 267	Diferencial
z2-z1	SETRA 267	Diferencial

Tabla 8.1. Referencias montaje 1.

8.2. MEDIDAS DE PRESION RADIAL.

Para caracterizar completamente el lecho también se han tomado medidas de presión radial en el interior del mismo. En la siguiente figura se observa el montaje.

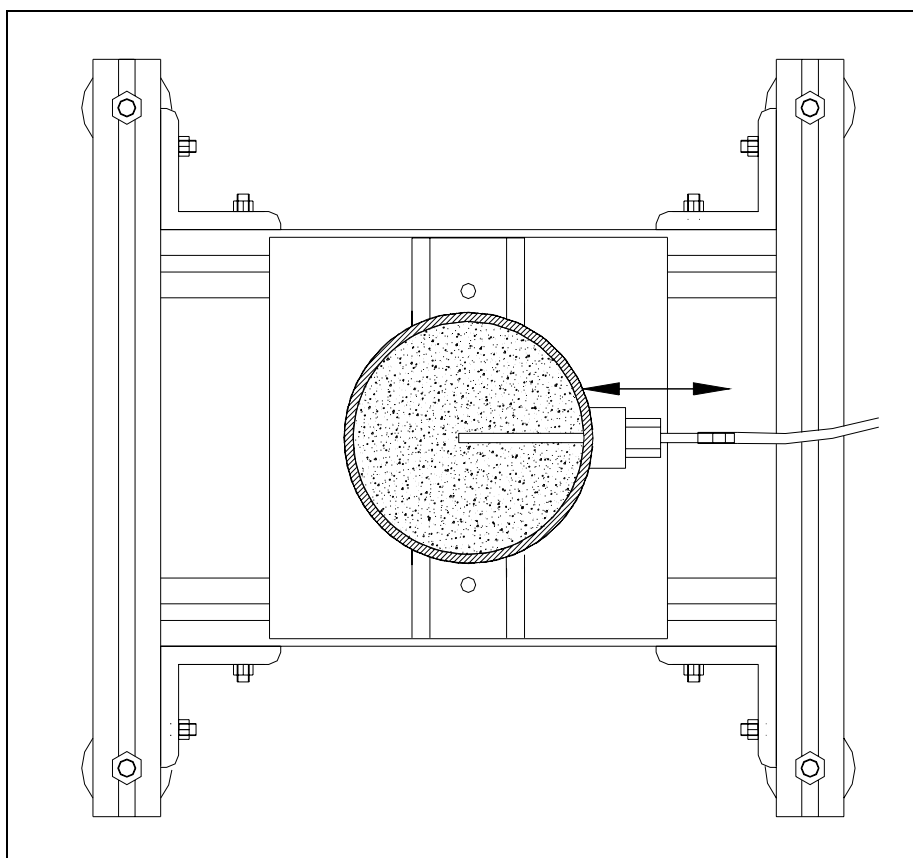


Figura 8.2. Esquema de montaje de toma de medidas. Montaje 2.

En la toma de medidas de presión radial se ha empleado el transductor modelo OMEGA PX 291-030W.

8.3. MEDIDAS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Para obtener mayor información acerca de la toma de medidas de presión diferencial se realiza la medida de las mismas para diferentes distancias de las sondas. En la siguiente figura se muestran el montaje realizado.

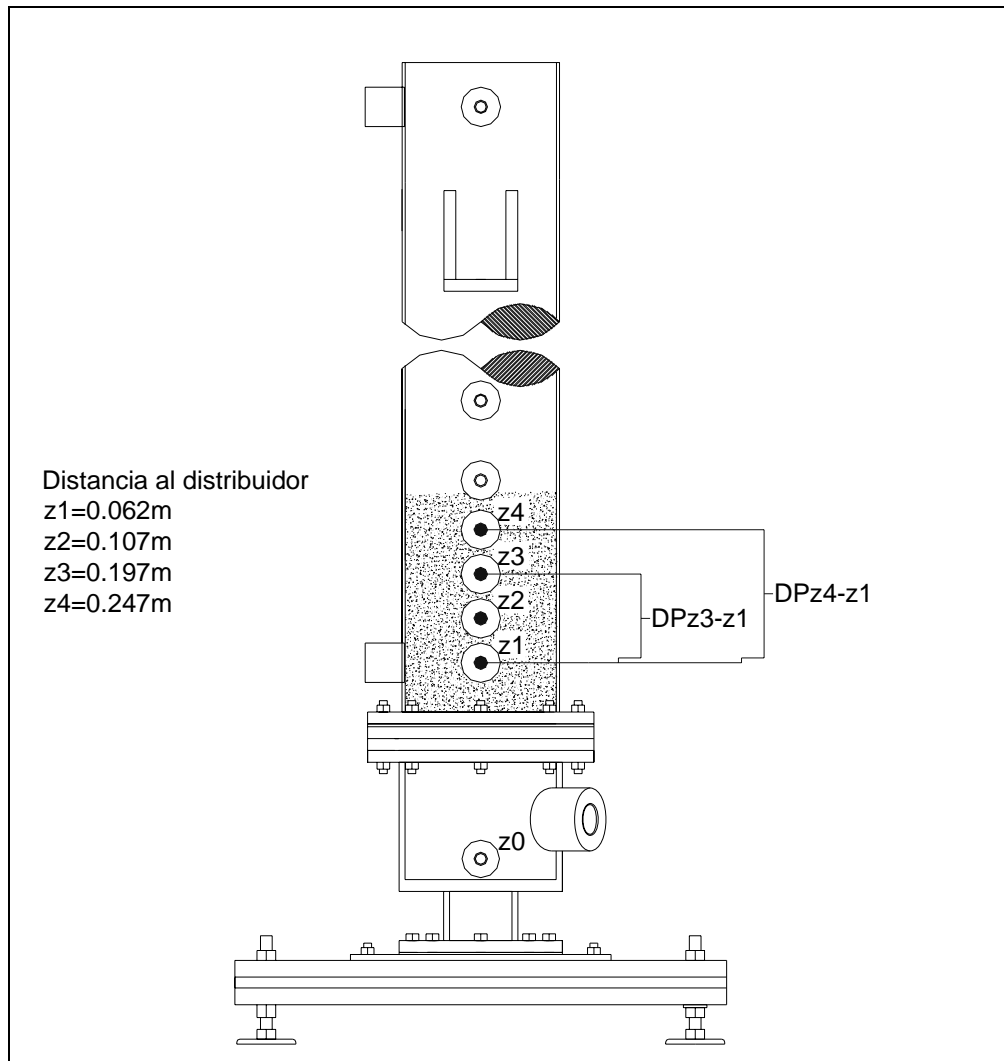


Figura 8.3. Esquema de montaje de medidas de presión diferencial. Montaje3.

En la tabla 8.2 se relacionan las referencias del montaje 3.

PUNTO DE MEDIDA	TRANSDUCTOR	MEDIDA
z1-z3	SETRA 267	Diferencial
z1-z4	SETRA 267	Diferencial

Tabla 8.2. Referencias montaje 3.

8.4. PROCESO DE MEDIDA.

Como se comentó anteriormente en el capítulo 7, podemos definir nuestro sistema de control, regulación, y toma de medidas de la instalación como un sistema semiautomático. Por una parte tenemos que controlar el funcionamiento del lecho y por la otra el sistema de toma de medidas. En la siguiente figura me muestra el proceso que debemos seguir en la toma de medidas.

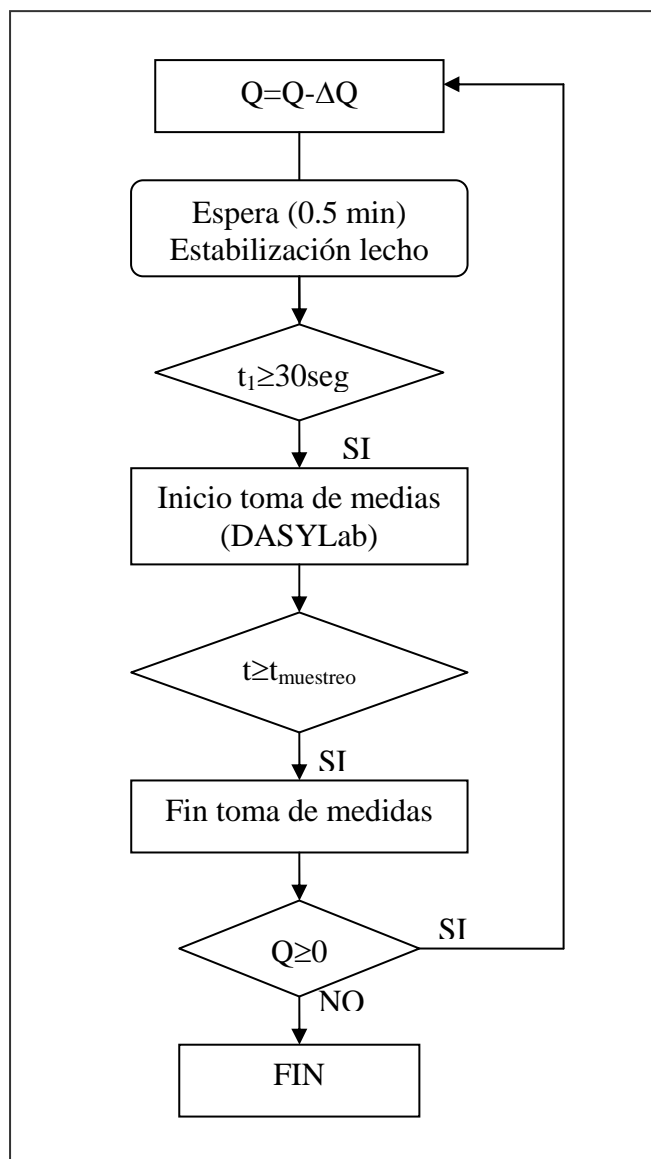


Figura 8.4. Proceso de regulación de la instalación y toma de media.

Todo el proceso esquematizado en la figura 8.4 es manual excepto la toma de medidas en sí. Por lo tanto, tenemos que regular el caudal, esperar un cierto tiempo para que el lecho se estabilice en el nuevo caudal de aire y posteriormente arrancar la toma de medidas. Una vez finalizada la toma de medias volveremos a regular el caudal, siempre disminuyéndolo para evitar la histéresis en las medidas, y repetiremos el proceso.

En la toma de medidas de presión radial, el proceso seguido es el mismo que el mostrado en la figura 8.4 pero una vez medidos todos los caudales de un punto la sonda la desplazamos manualmente al siguiente punto radial y repetimos el proceso hasta completar la medida en todo el diámetro del lecho.

8.5. APLICACIÓN MÉTODO TEÓRICO.

Para poder comparar los resultados obtenidos a partir de las medidas experimentales tomadas en el lecho y así poder validar nuestro trabajo, compararemos éstas con los resultados que ofrece el desarrollo teórico expuesto en el capítulo 3 para obtener la velocidad mínima de fluidización. Recuperando la ecuación de Ergun vista en dicho capítulo:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu U}{d^2} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} + 1.75 \frac{\rho U^2}{d} \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \quad (3.18)$$

La pérdida de carga para el régimen de lecho fluidizado la obtenemos simplemente como el peso de las mismas en el tramo de lecho considerado:

$$\frac{\Delta p}{L} = (\rho_s - \rho)g(1 - \varepsilon_0) \quad (3.21)$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación de Ergun aplicada a un lecho fluidizado obtenemos la siguiente expresión:

$$(\rho_s - \rho)g(1 - \varepsilon_0) = 150 \frac{\mu U_{mf}}{d^2} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} + 1.75 \frac{\rho U_{mf}^2}{d} \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \quad (8.1)$$

Para aplicar la ecuación de Ergun ya conocemos de antemano las propiedades de las partículas y las propiedades del lecho calculadas en el apartado 7.2.

8.6. APLICACIÓN DE LOS METODOS EXPERIMENTALES.

Tal y como se comentó en el capítulo anterior, los valores de tensión obtenidos de los transductores se guardan directamente en un fichero con formato ASCII para su posterior tratamiento. Para cada punto de medida tenemos un total de 64000 datos, lo cual hace necesario una herramienta potente y capaz de poder manejar los datos de todos los puntos de medida mediante matrices y vectores para agilizar los cálculos.

Para ello se ha empleado un pequeño programa desarrollado en Matlab capaz de leer los ficheros de datos y poder realizar todos los cálculos necesarios y mostrarnos en pantalla los resultados buscados así como las gráficas necesarias.

En el capítulo 6 se expusieron los fundamentos de los métodos experimentales utilizados: método de pérdida de carga y el método de las fluctuaciones de presión.

Para aplicar ambos métodos, se han tomado diferentes medidas de las fluctuaciones de presión que adecuaremos a cada método mediante los cálculos apropiados. En la figura 8.5 se muestra un diagrama con los pasos seguidos para tratar los datos.

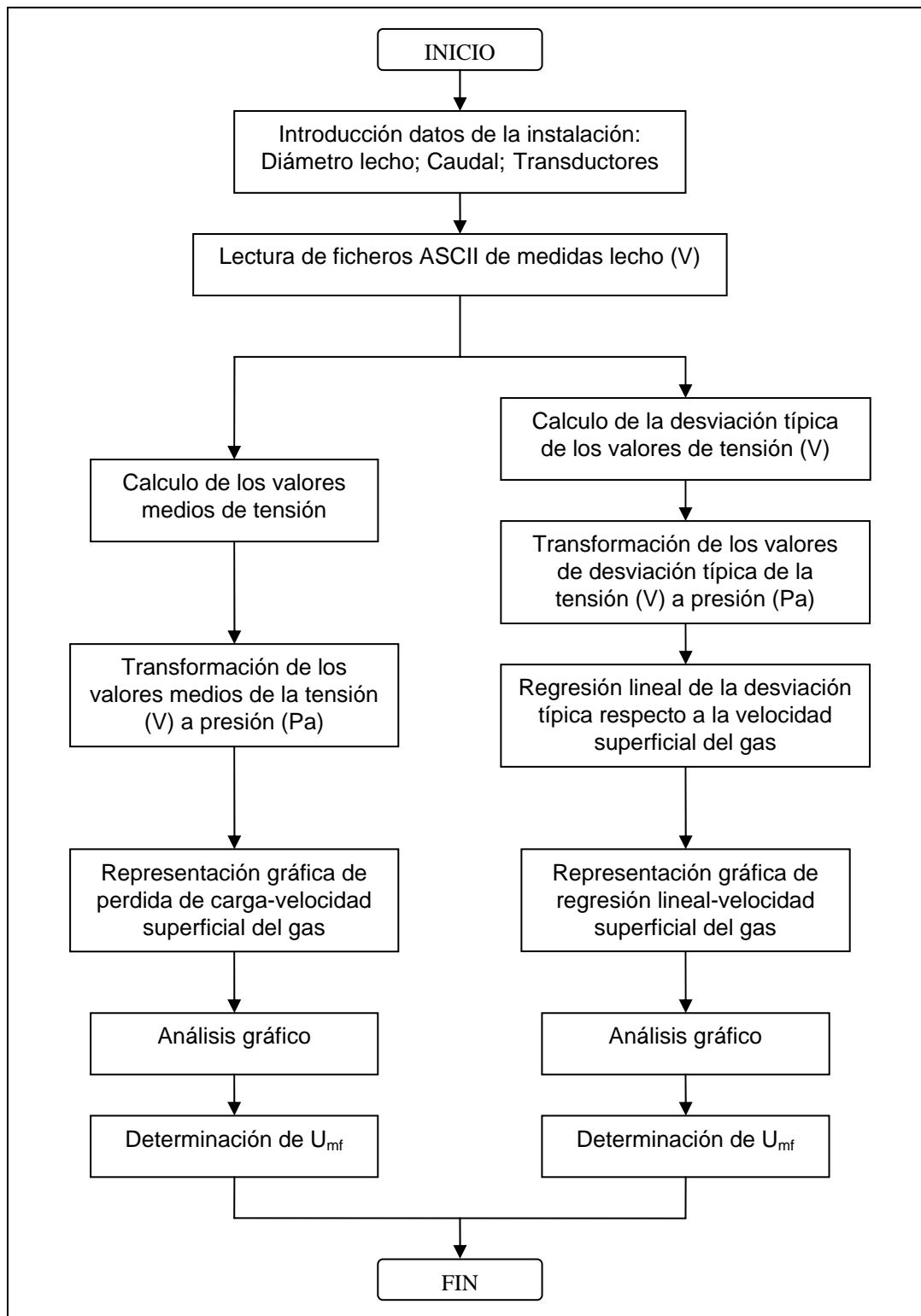


Figura 8.5. Esquema proceso tratamiento datos experimentales.

En el anexo 3 se adjuntan los diferentes programas que realizan el tratamiento esquematizado en la figura anterior.

En primer lugar debemos introducir todos los datos referentes al sistema como parámetros geométricos del lecho, caudales utilizados en las medidas, funciones de transducción de los transductores, etc. Después tenemos que leer los ficheros ASCII que nos proporcionan las series de presión para cada caudal.

8.6.1. *TRATAMIENTO MÉTODO PERDIDA DE CARGA EN EL LECHO.*

A partir de la lectura de los datos de tensión, obtenemos la tensión media de los mismos de la siguiente manera:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (8.2)$$

Donde V_i es un valor de tensión de N valores que forman la serie medida.

Una vez obtenida la tensión media la transformamos en valores de presión mediante las funciones de transducción de los transductores vistas en el apartado 7.3.2:

$$\overline{\Delta p} = a_z + b_z \bar{V} \quad (8.3)$$

Siendo a_z y b_z los parámetros del transductor utilizado en cada caso.

Una vez obtenida la pérdida de carga, podemos graficarla en función de la velocidad superficial del gas. Analizando la gráfica obtenida podemos determinar la velocidad mínima de fluidización del lecho como aquella donde la recta 8.3 intersecta con la ordenada que es igual al peso de las partículas que se encuentran por encima del punto donde hemos tomado la medida de presión o la que es igual al peso de las partículas que se encuentran entre las sondas de una toma diferencial. Por lo tanto:

$$\Delta p = \frac{m_b g}{A} \quad (8.4)$$

Donde m_b es la masa de la fracción de lecho considerada y A es la sección transversal del lecho.

8.6.2. TRATAMIENTO MÉTODO DE LA DESVIACIÓN TÍPICA.

Para obtener la desviación típica actuamos de la misma manera. En primer lugar operamos los valores de tensión y posteriormente los traducimos a valores de presión:

$$\sigma_v = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.5)$$

Una vez obtenida la desviación típica de los valores de tensión la transformamos a valores de presión. Haciendo el desarrollo completo del cálculo de la desviación típica se puede demostrar que la transformación sólo depende de la pendiente de la función de transducción:

$$\sigma_p = b_z \sigma_v \quad (8.6)$$

Una vez obtenida la desviación típica para cada valor de caudal de aire utilizado podemos graficarla en función de la velocidad superficial del gas. Según lo visto en el apartado 6.2, los diferentes puntos de desviación para cada velocidad del gas forman una recta que nos proporciona la velocidad mínima de fluidización cuando el valor de la ordenada de la misma es cero (el fundamento teórico se encuentra explicado en el apartado 6.2). Por lo tanto, calcularemos la regresión lineal de los puntos de desviación típica para obtener una recta.

La regresión lineal nos devuelve una función como la siguiente:

$$\sigma_p = A + BU \quad (8.7)$$

Donde si consideramos que para las partículas que utilizamos (grupo B), la velocidad mínima de fluidización es igual a la velocidad de mínimo burbujeo y por lo tanto la desviación típica de las fluctuaciones es nula:

$$\sigma_p = 0 \Rightarrow U_{mf} = -\frac{A}{B} \quad (8.8)$$

Gráficamente determinaremos la velocidad mínima de fluidización como aquella en la que las regresiones obtenidas de las diferentes series de la desviación típica obtenidas cortan el eje de abscisas cuando la ordenada es cero.

9. RESULTADOS.

En los siguientes apartados se exponen todos los resultados obtenidos al aplicar los métodos vistos para caracterizar el lecho. Fundamentalmente se han estudiado la pérdida de carga en el distribuidor, la pérdida de carga en el lecho, la velocidad mínima de fluidización, las burbujas en el lecho, y la frecuencia característica del mismo.

9.1. PERDIDA DE CARGA EN EL DISTRIBUIDOR.

Para obtener la pérdida de carga en el distribuidor medimos directamente la presión diferencial entre la sonda ubicada en el plenum (z_0), y el primer punto de la columna (z_1), con el lecho vacío de partículas.

Es necesario calcular la mínima pérdida de carga requerida para una fluidización uniforme, y así evitar sobrecostos en los elementos de impulsión del gas. Entre los diferentes valores y correlaciones propuestos Hiby (1964) [20], nos ofrece el siguiente valor de la pérdida de carga en el distribuidor para conseguir una fluidización uniforme:

$$\Delta p_d = 0.15 \Delta p \text{ para } U = (1 - 2)U_{mf} \quad (9.1)$$

Donde Δp_d es la pérdida de carga en el distribuidor y Δp la pérdida de carga a través del lecho de partículas.

En la Figura 9.1 se muestra la pérdida de carga en el distribuidor frente a la velocidad del gas.

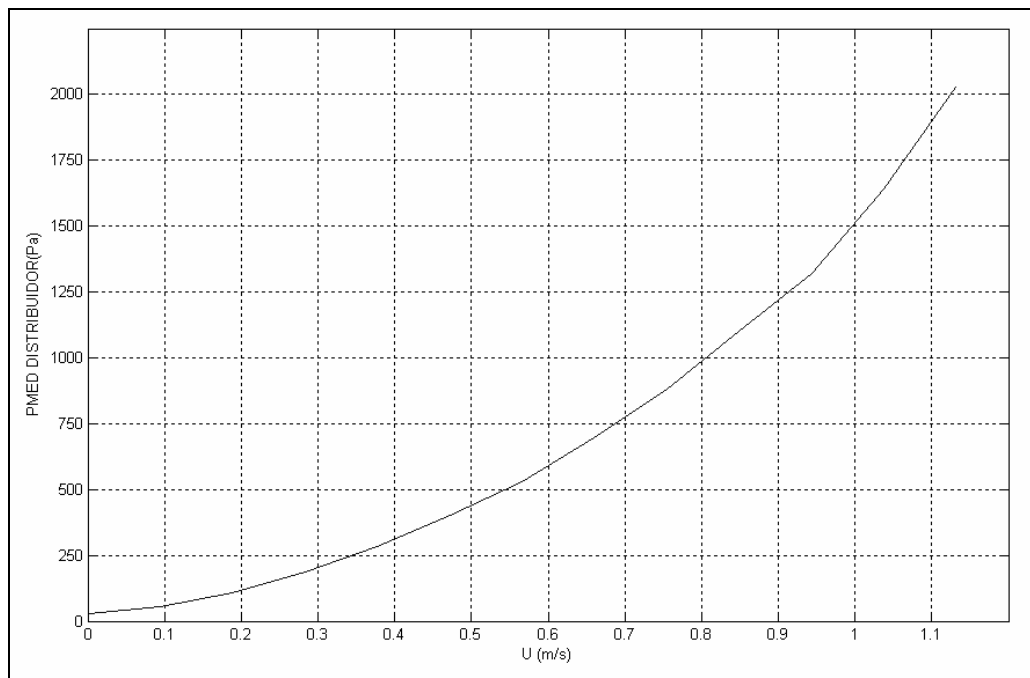


Figura 9.1. Pérdida de carga en el distribuidor Δp_d respecto a la velocidad del gas de entrada U .

Como podemos observar, la pérdida de carga varía de forma cuadrática respecto a la velocidad del aire tal y como se demuestra en los diferentes estudios para un distribuidor de plato perforado.

Para validar el diseño de nuestro distribuidor de cara a obtener una fluidización uniforme, en la figura 9.2 se representa la relación entre la pérdida de carga en el distribuidor y la pérdida de carga del lecho en función del exceso de aire.

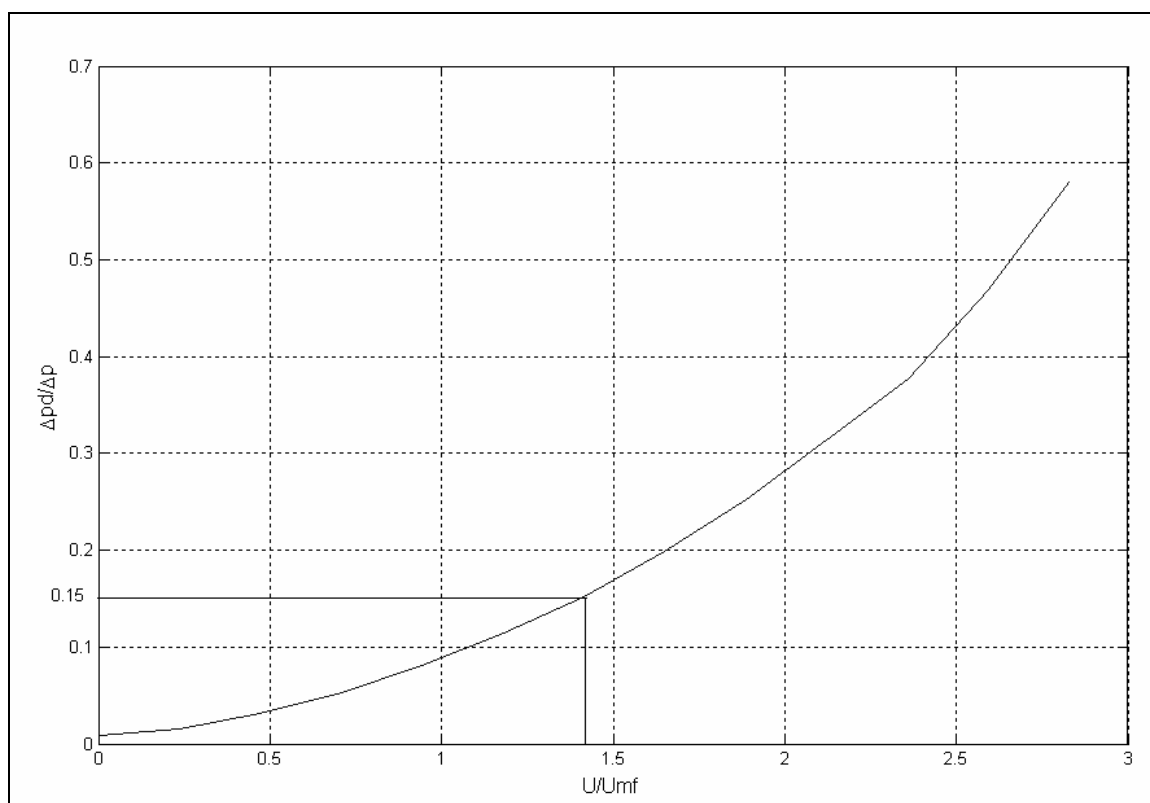


Figura 9.2. Relación de pérdida en el distribuidor y pérdida de carga en el lecho ($\Delta p_d / \Delta p$) frente al exceso de aire (U / U_{mf}).

Como podemos observar en la figura, aproximadamente obtenemos el valor de Hiby, $\Delta p_d / \Delta p = 0.15$, para un exceso de aire $U / U_{mf} = 1.4$. Con lo cual podemos decir que el diseño del distribuidor es correcto y nos garantiza un perfil uniforme del flujo de gas que pasa al lecho.

9.2. PÉRDIDA DE CARGA EN EL LECHO.

La pérdida de carga en el lecho la obtenemos a partir de la medida de presión absoluta en el plenum y la pérdida de carga en el distribuidor.

$$\Delta p = P_{\text{plenum}} - \Delta p_d \quad (9.2)$$

En la siguiente figura se muestra la pérdida de carga en el lecho en función de la velocidad superficial del gas.

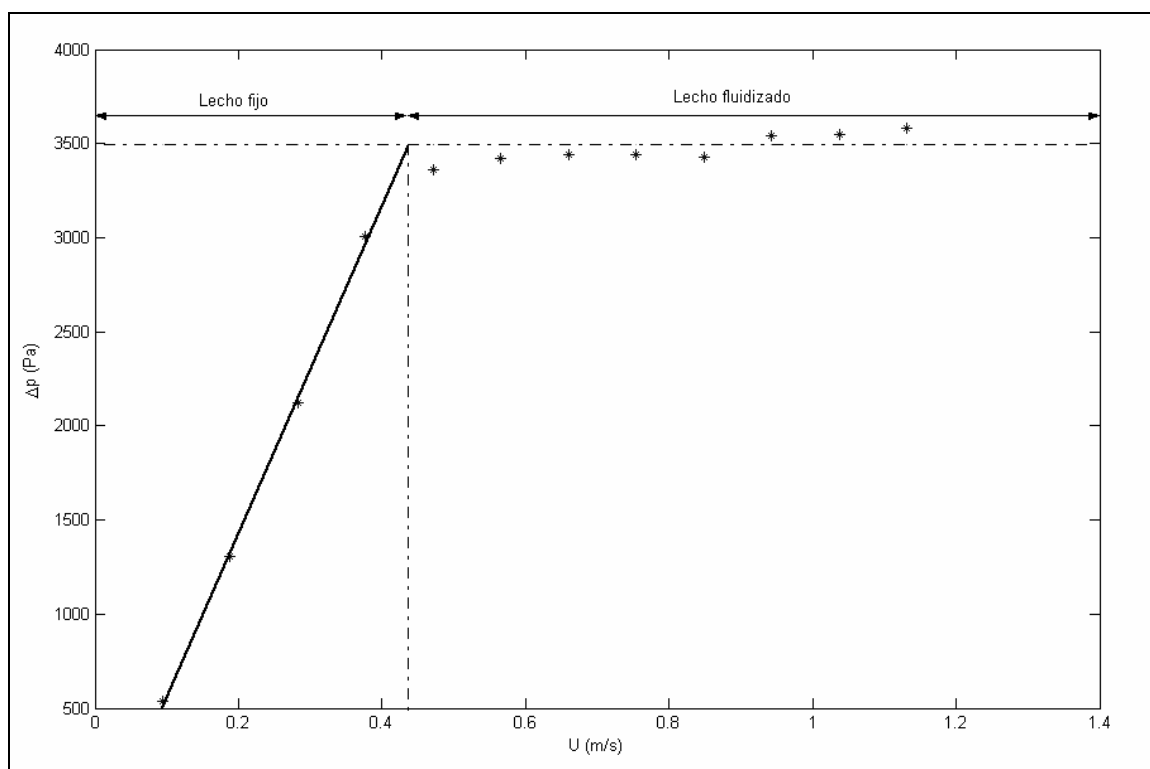


Figura 9.3. Pérdida de carga en el lecho.

Como podemos observar, la gráfica resultante representa claramente la curva característica de pérdida de carga de los lechos fluidos gas-sólido. A baja velocidad del gas tenemos la zona de “lecho fijo”, en la cual al aumentar la velocidad superficial del gas aumenta la pérdida de carga en el lecho y éste todavía no se encuentra fluidizado. Esta zona se puede modelar mediante la ecuación de Ergun. Seguidamente tenemos una zona recta en la que el lecho ya se encuentra fluidizado (zona de “lecho fluidizado”), y cuya pérdida de carga se mantiene constante frente al aumento de la velocidad superficial del gas. Ajustando la recta de lecho fijo e igualándola con la de lecho fluidizado podemos obtener la velocidad de mínima fluidización (se trata en el siguiente apartado).

Por otra parte, la pérdida de carga en el lecho fluidizado la podemos calcular con la expresión (8.4), como el peso de las partículas contenidas en el mismo por unidad de sección del lecho:

$$\Delta p = \frac{m_b g}{A} \Rightarrow \Delta p = 3500 Pa \quad (8.4)$$

Observando la figura 9.3 se puede comprobar que la perdida de carga obtenida teóricamente coincide con la obtenida experimentalmente en el lecho.

9.3. VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION.

Para obtener la velocidad mínima de fluidización se han aplicado tres métodos diferentes: método experimental de la pérdida de carga, método experimental de la desviación típica, y método teórico aplicando la ecuación de Ergun. Posteriormente se compararan los resultados obtenidos tomando como referencia el método teórico.

En la siguiente figura se muestra la perdida de carga en diferentes puntos del lecho a partir de la cual se obtiene gráficamente la velocidad mínima de fluidización.

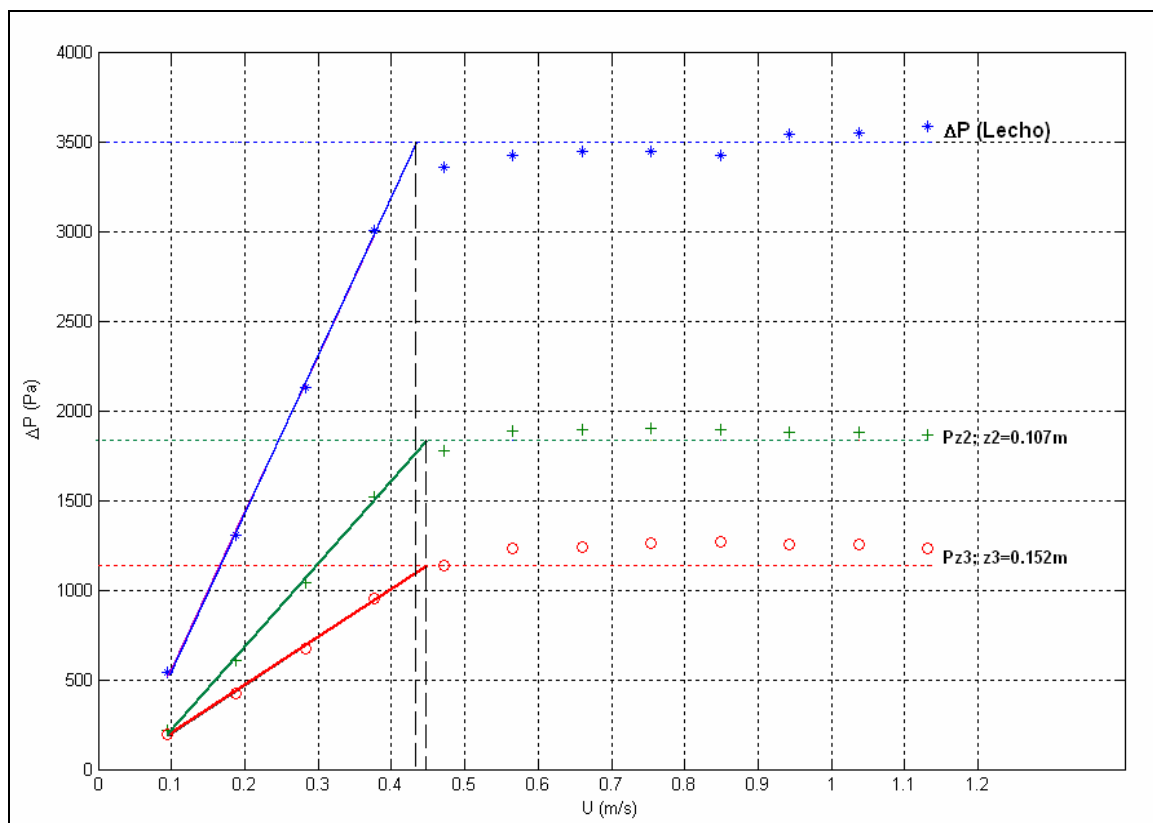


Figura 9.4. Perdida de carga en el lecho medida en varios puntos del mismo. Montaje 1.

Como podemos observar en la figura, comparando la gráfica de perdida de carga en el lecho con las de la perdida de carga producida en dos puntos diferentes del mismo se puede determinar que la velocidad mínima de fluidización obtenida es semejante. Con lo cual, podemos medir la perdida de carga en el lecho en cualquier punto para

determinar la velocidad de mínima fluidización del mismo. El error producido por este método es mayor que con el método de la desviación típica puesto que interviene tanto la zona de lecho fijo como la de lecho fluidizado.

El otro método experimental utilizado es el cálculo de la desviación típica de las fluctuaciones de presión. En la figura 9.5 se muestran las curvas obtenidas de la aplicación de éste método.

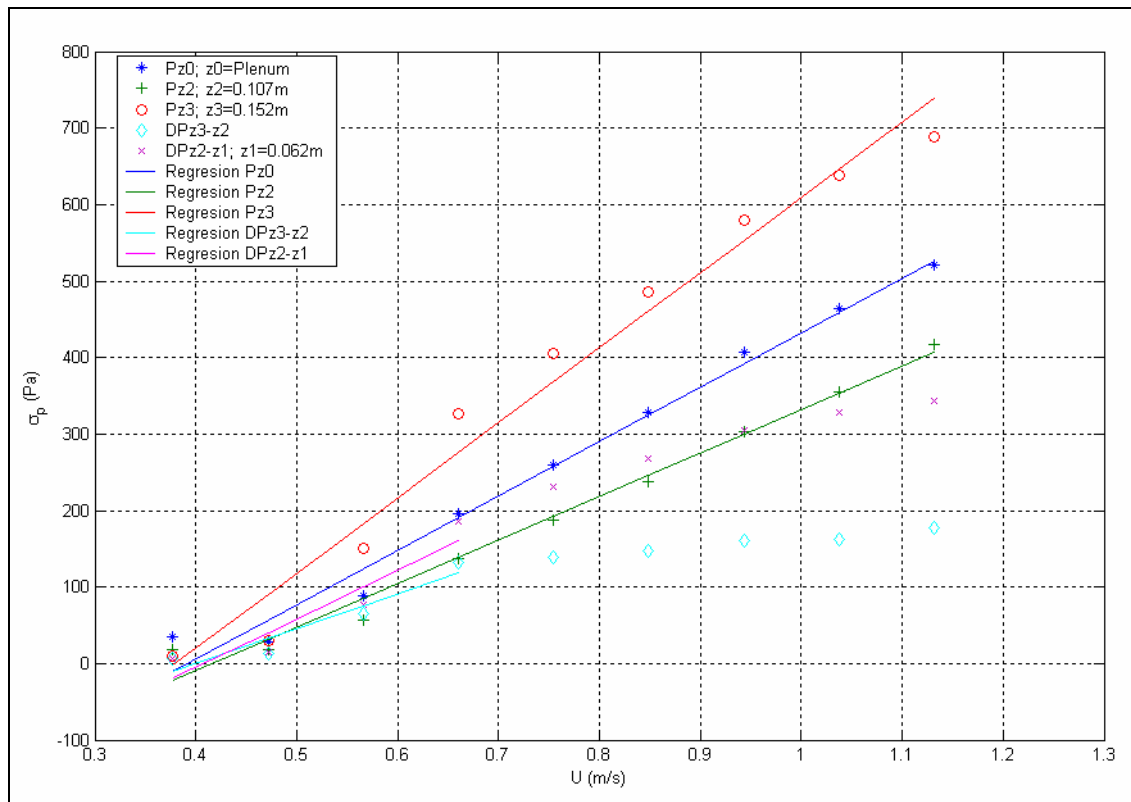


Figura 9.5. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en el lecho en función de la velocidad superficial del gas. Montaje 1.

En la figura podemos observar como las medidas de presión absoluta ($z0$, $z2$, y $z3$), convergen a un valor de velocidad mínima de fluidización aproximadamente de 0.4m/s cuando la desviación típica de las mismas tiende a 0 (explicado en apartado 6.2).

En la siguiente figura se presenta en detalle el punto de obtención de U_{mf} para identificar con mayor precisión el valor de la velocidad mínima de fluidización. Para obtener U_{mf} ajustamos las diferentes rectas y las igualamos a 0.

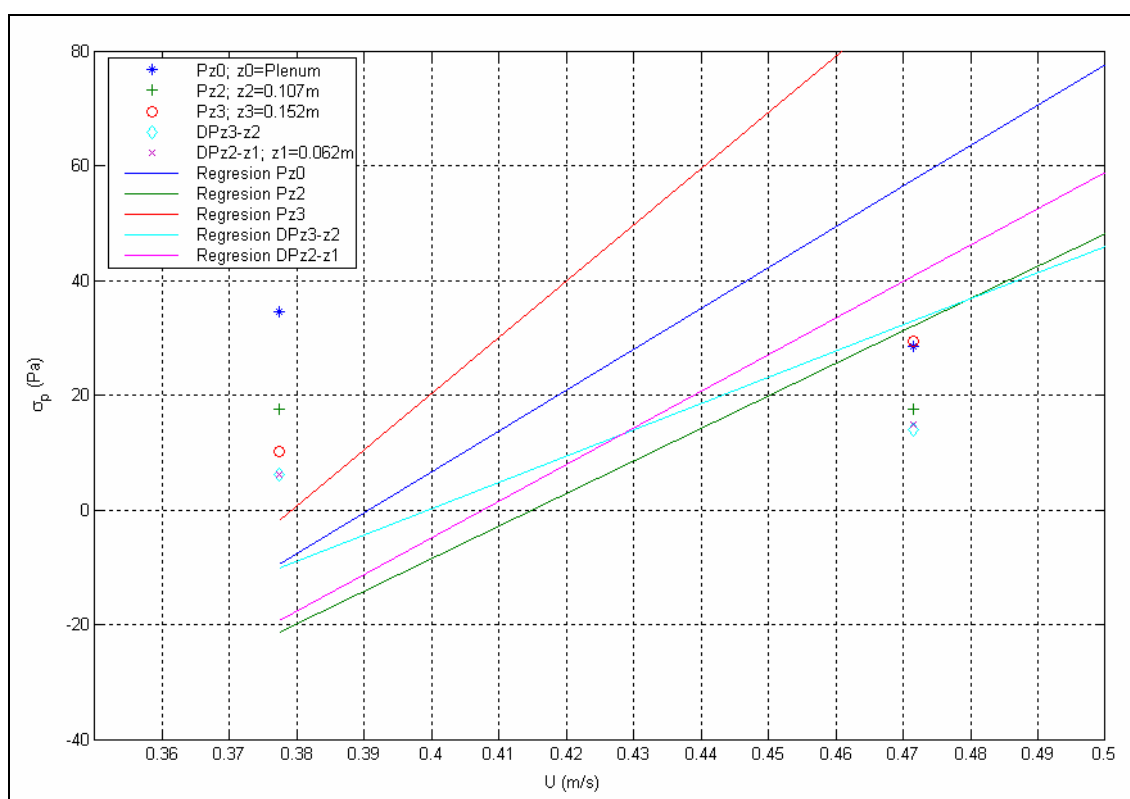


Figura 9.6. Detalle figura 9.5. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en el lecho en función de la velocidad superficial del gas. Montaje 1.

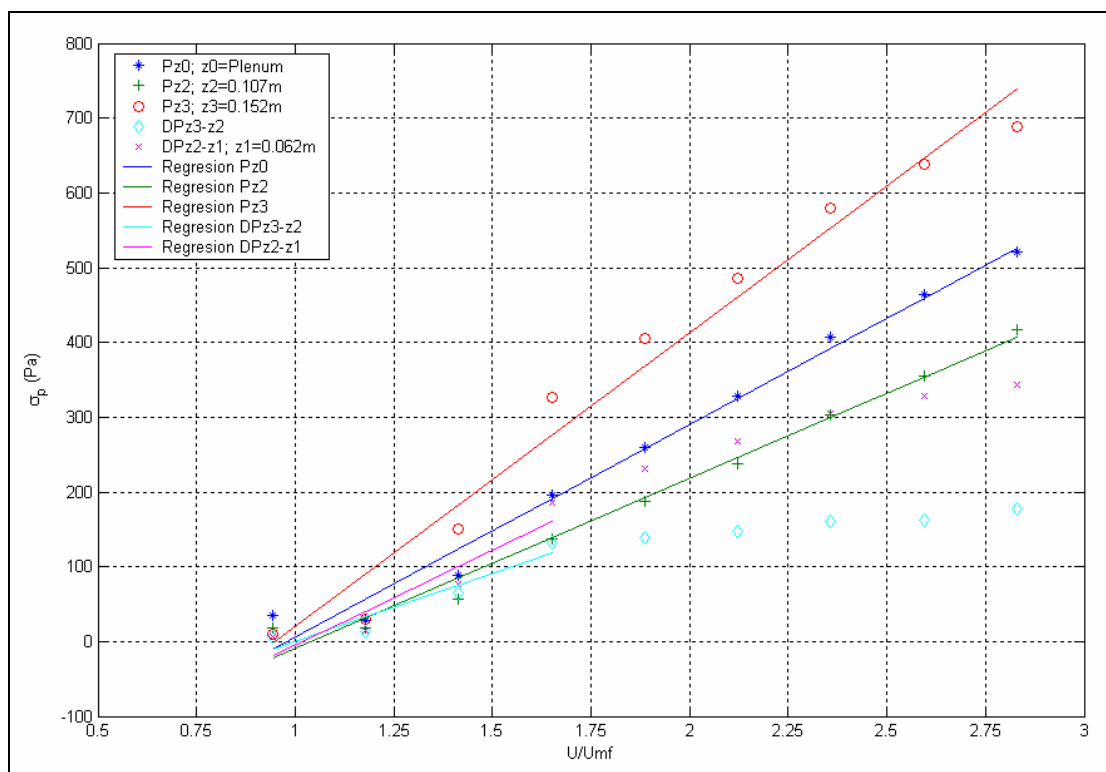


Figura 9.7. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en el lecho respecto al exceso de aire en el mismo. Montaje 1.

En la figura 9.7 se muestra la desviación típica de las fluctuaciones depresión en función del exceso de aire en el lecho. Como puede observarse, a mayor altura la desviación típica es mayor puesto que las burbujas que pasan por es sensor son de mayor tamaño y además nos encontramos más cerca de la superficie.

Tal y como se explica en el capítulo 4, la aparición de burbujas se debe al exceso de aire a través del lecho y por lo tanto las fluctuaciones de presión también. Cabe recordar que las partículas utilizadas pertenecen al grupo B, en el que $U_{mb}=U_{mf}$.

Si atendemos a las series de presión diferencial (DPz3-z2, y DPz2-z1), podemos observar cómo la recta de desviación típica frente a velocidad superficial del gas cambia de pendiente aproximadamente a 0.6m/s. Este fenómeno es debido a que las medidas de presión diferencial en el lecho registran fluctuaciones locales de presión que se deben fundamentalmente al paso de las burbujas entre los dos puertos del sensor. Por otra parte, la medida depende también de la separación entre los dos puertos del sensor. Podemos concluir por tanto que no es posible aplicar el método de la desviación típica a medidas diferenciales de presión.

En cuanto a los resultados teóricos, aplicamos la ecuación de Ergun (3.18) en condiciones de mínima fluidización para obtener la velocidad del gas en dichas condiciones. Para ello aproximamos la fracción de vacío del lecho en condiciones de mínima fluidización con la obtenida en fase densa (apartado 7.2):

$$\varepsilon_{mf} = \varepsilon_0 \Rightarrow \rho_b = (1 - \varepsilon_0) \rho_s \Rightarrow \varepsilon_0 = 0.402 \quad (5.5)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu U}{d^2} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} + 1.75 \frac{\rho U^2}{d} \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \quad (3.18)$$

Como podemos observar, no podemos obtener la velocidad directamente despejándola de la ecuación. Para ello se iterará hasta que la solución converja a la solución con un determinado error relativo.

En la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos empleados, y su variación respecto al valor teórico.

	Método teórico	Métodos experimentales			
		$\Delta p - U$	$\sigma_p - U$		
			z0	z2	z3
U_{mf} (m/s)	0.381	0.43	0.39	0.41	0.38
Variación(%)	-	11.39	2.3	8.2	0.2

Tabla 9.1. Velocidad mínima de fluidización para diferentes métodos. Montaje 1.

Como se puede observar en la tabla, y tal y como se ha comentado anteriormente, el método de la desviación típica proporciona un valor de U_{mf} más cercano al obtenido mediante la ecuación de Ergun.

9.4. PRESION DIFERENCIAL, MODELO DE DAVIDSON.

Atendiendo a las medidas de presión diferencial, podemos observar que se produce un cambio de pendiente en los valores de desviación típica de la presión en el lecho (figura 9.5), alrededor de 0.6m/s debido a que las medidas diferenciales de presión en un lecho recogen fenómenos locales.

Por otra parte, el paso de una burbuja por un punto del lecho produce una fluctuación de la presión media en dicho punto (apartado 4.3, Modelo de Davidson). Si consideramos que tenemos dos sondas por las que pasa una burbuja en un espacio de tiempo Δt , y después hacemos la diferencia entre ambas señales, es posible que se produzca un cambio de la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

Mediante la aplicación teórica del modelo de Davidson (1963), intentaremos ofrecer una explicación al cambio de pendiente de la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

En las figuras 9.8 y 9.9 se muestran la aplicación del modelo de Davidson en dos puntos para diferentes velocidades. En ambas graficas podemos observar la fluctuación que produce el paso de una burbuja por dos puntos del lecho semejantes a los que tenemos en nuestra instalación. Se puede comprobar que la medida diferencial de ambas fluctuaciones produce otra fluctuación que varía en función de la velocidad superficial de gas y la separación entre los sensores.

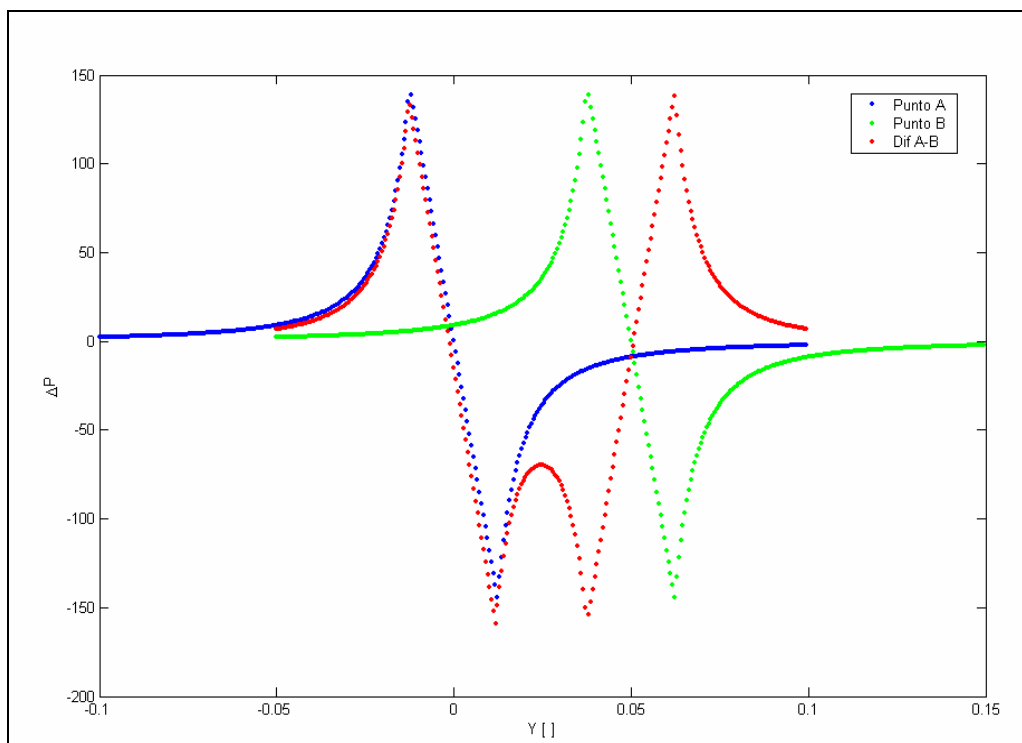


Figura 9.8. Modelo de Davidson aplicado a la medida diferencial. $s=0.05\text{m}$; $Q=600\text{l/min}$.

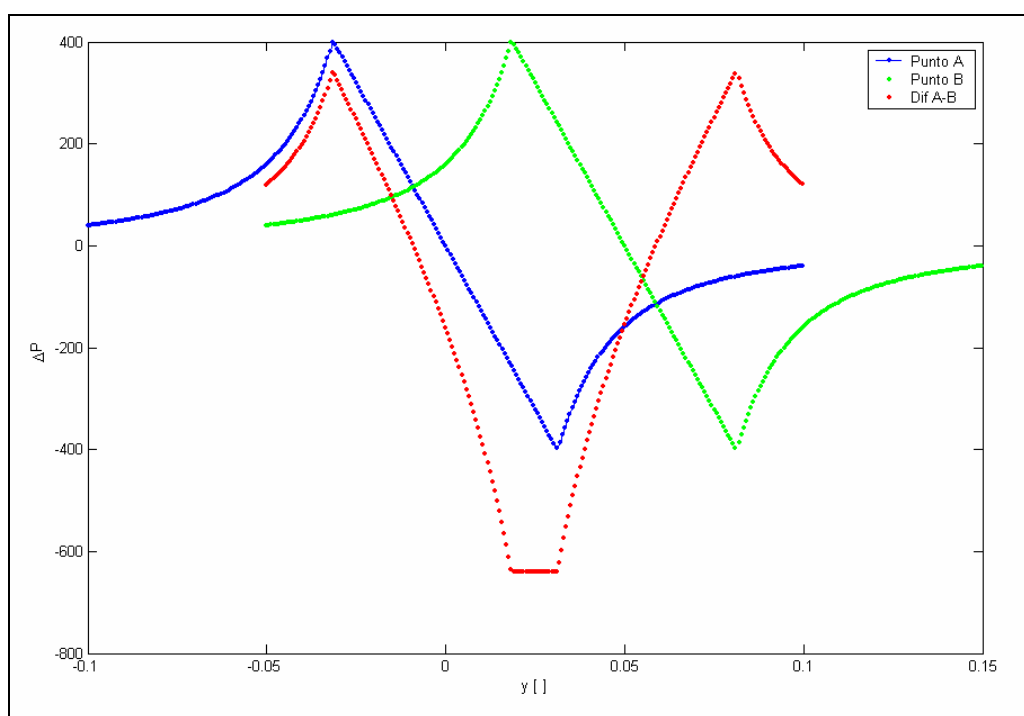


Figura 9.9. Modelo de Davidson aplicado a la medida diferencial. $s=0.05m$; $Q=1200l/min$

Si aplicamos el modelo de Davidson a los puntos de medida de presión diferencial de nuestro lecho obtenemos las curvas mostradas en la figura 9.10.

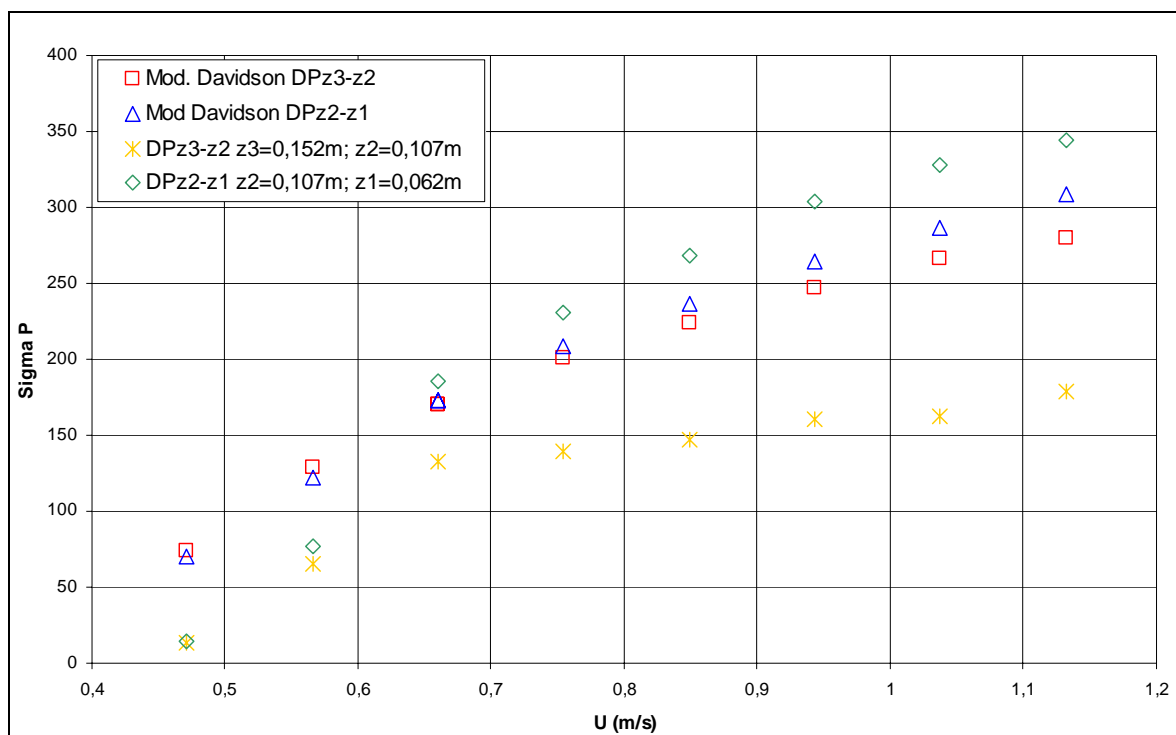


Figura 9.10. Comparación aplicación Modelo Davidson-resultados experimentales.

Aplicando el modelo de Davidson hemos obtenido la señal de presión diferencial entre los dos puntos considerados. La desviación típica de ésta presión frente a la velocidad es lineal pero existe un cambio de pendiente a una determinada velocidad.

En la figura 9.10 también podemos observar que el modelo de Davidson no describe perfectamente el efecto de la medida ya que existen numerosos fenómenos que provocan fluctuaciones de presión aparte del paso de la burbuja. Por otra parte, puesto que la medida es diferencial los efectos globales del lecho (por ejemplo explosión de burbujas en la superficie), afectan a los dos puertos de presión diferencial y por lo tanto se resta y su efecto es mucho menor.

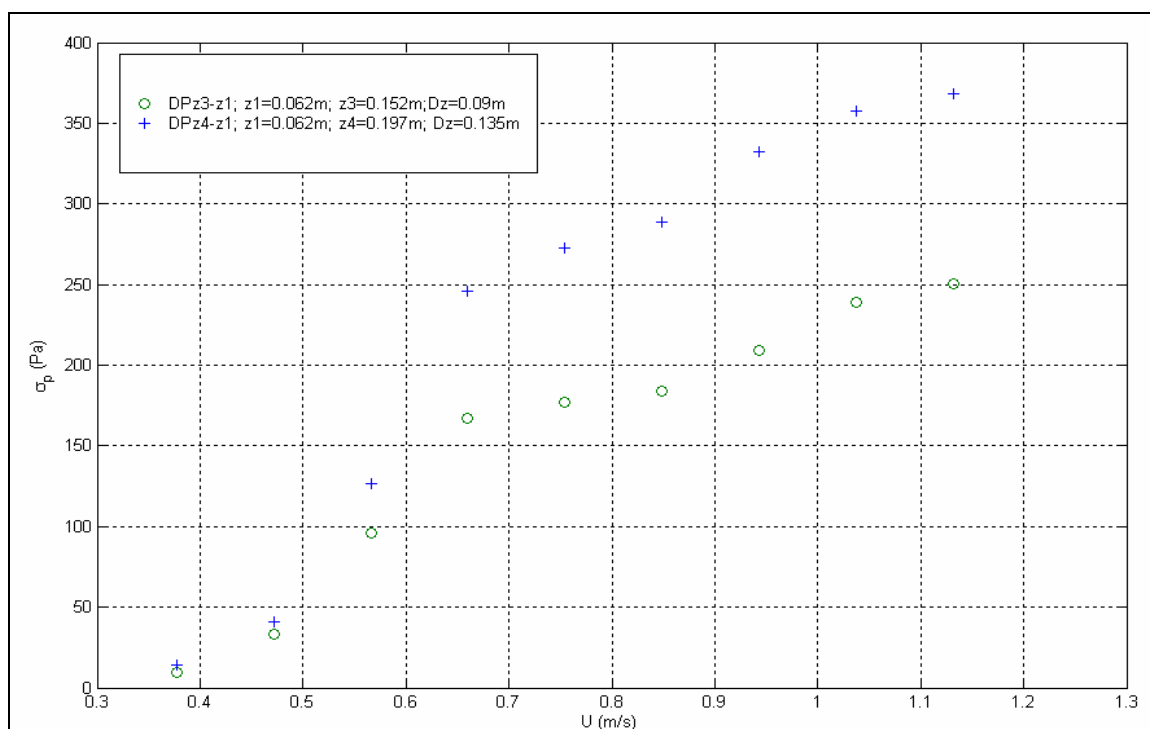


Figura 9.11. Variación de la desviación típica respecto a la separación de las sondas. Montaje3.

Atendiendo a la separación entre las sondas de presión, si éstas se alejan una distancia tal que el efecto del paso de una burbuja por ambas este suficientemente desfasado en el tiempo, la diferencia entre ambas medidas se aproximará a la medida de presión absoluta puesto que el tramo de lecho medido será mayor y por lo tanto los efectos medidos serán más globales. En la figura 9.11 se muestran dos medidas de presión diferencial para diferentes espaciados entre las sondas (montaje 3, figura 8.3). En dicha figura podemos observar que para una distancia entre las sondas de 0.135m las fluctuaciones de presión son mayores y la medida se asemeja a una medida de presión absoluta. Por el contrario, para una distancia menor entre los puertos del sensor el cambio de pendiente es más pronunciado obteniendo el mismo efecto que el expuesto anteriormente. Por lo tanto, si la distancia entre puertos del sensor aumenta recogeremos medidas de efectos más globales acercándonos a los resultados obtenidos mediante la medida d presión absoluta.

9.4.1. SLUGGING.

Debido que nuestro lecho es estrecho, debemos de controlar el efecto del slugging y caracterizarlo. Aplicando la ecuación 4.5 (apartado 4.2), podemos obtener el diámetro de las burbujas en el lecho para determinar la existencia de slugging.

$$d_{b0} = \frac{2.78}{g} (U - U_{mf})^2 \quad \text{para } d_{b0} > l_{or} \quad [1] \quad (4.5)$$

En la figura 9.12 se representa el diámetro de las burbujas al salir del distribuidor.

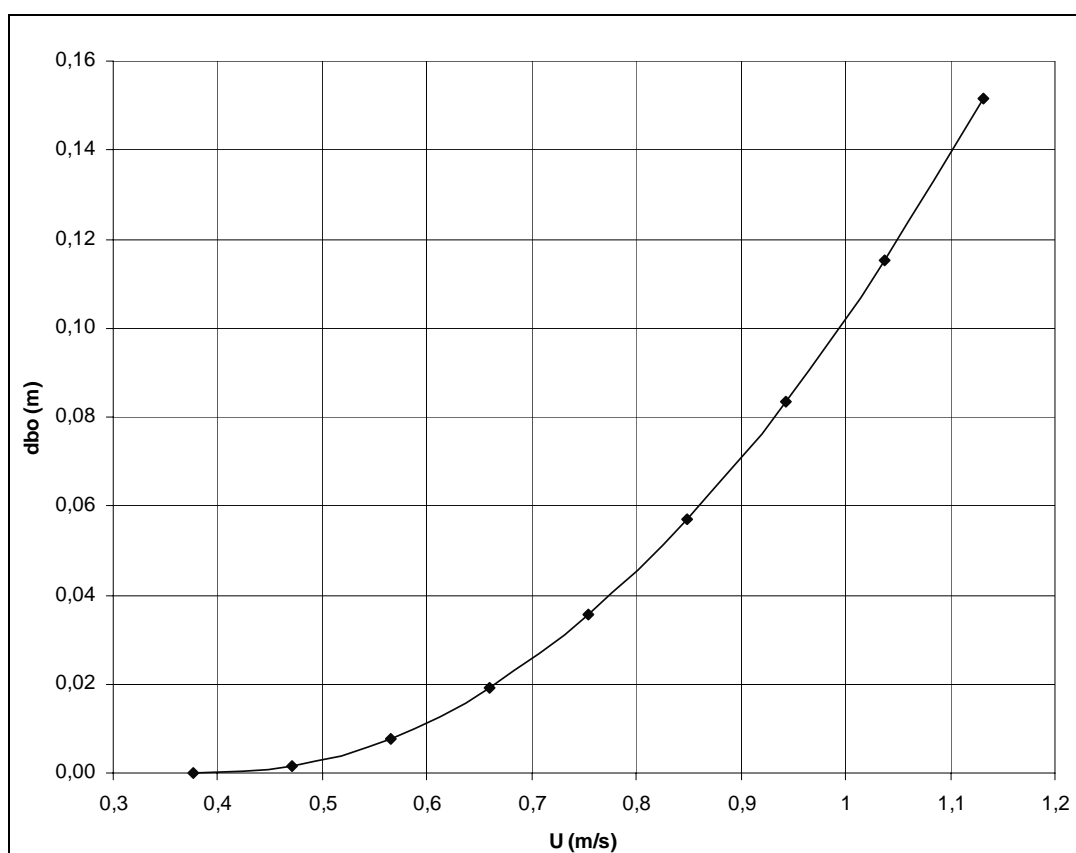


Figura 9.12. Diámetro de las burbujas al salir del distribuidor.

La distancia entre centros de los orificios del distribuidor es 2.62cm (apartado 7.1), por lo tanto la condición para poder aplicar la ecuación (4.5) se cumple para $U > 0.7 \text{ m/s}$. Si consideramos que la aparición de slugs se produce para $d_b/D > 0.6$ (apartado 4.2), podemos decir que en nuestro lecho se produce slugging a partir de 0.95 m/s . Con lo cual, para $Q > 1000 \text{ l/min}$ se produce slugging en nuestro lecho con slugs de pared tal y como muestra la figura 9.13.



Figura 9.13. Fotografía de slugging producido en el lecho. $Q=1200\text{l/min.}$

9.5. PRESION RADIAL EN EL LECHO.

Para definir mejor el lecho podemos medir la presión radial en el mismo. En el montaje 2 (apartado 8.2), se muestra como se ha obtenido la presión radial en el lecho. En la siguiente figura se muestra la presión media en cada punto del diámetro y para cada velocidad.

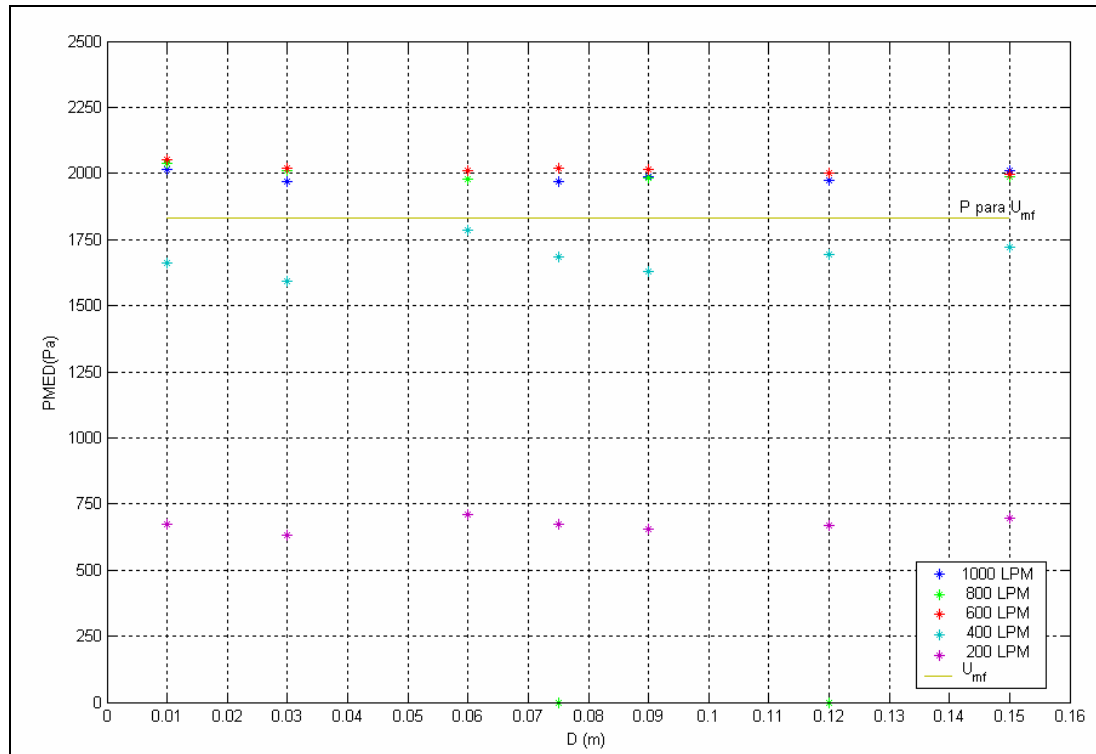


Figura 9.14. Presión total radial en el lecho en $z_2=0.107m$ para diferentes caudales. Montaje 2.

En la figura 9.14 se puede observar que la presión se mantiene constante en todo el diámetro del lecho para una misma velocidad del gas. Era de esperar este efecto ya que cuando medimos presión absoluta con un transductor de presión estamos midiendo globalmente lo que ocurre en toda la sección y por lo tanto no medimos fenómenos locales en cada punto del diámetro.

Por otra parte, se observa que al aumentar la velocidad del gas por encima de la de mínima fluidización la presión no aumenta y las líneas de presión se radial se agrupan entorno a la presión de lecho fluidizado.

9.6. FRECUENCIA CARACTERISTICA DEL LECHO.

Para obtener la frecuencia característica del lecho realizamos el desarrollo de Fourier de las fluctuaciones de presión medidas. Dado el interés que tenemos en conocer todos los aspectos relacionados con el paso de burbujas por el lecho, elegiremos una velocidad del gas para la que se pueden apreciar burbujas grandes sin llegar a ser slugs. Por lo tanto se ha optado por elegir $Q=800l/min$. En la siguiente figura se muestra el espectro de Fourier de la presión a dicha velocidad del gas.

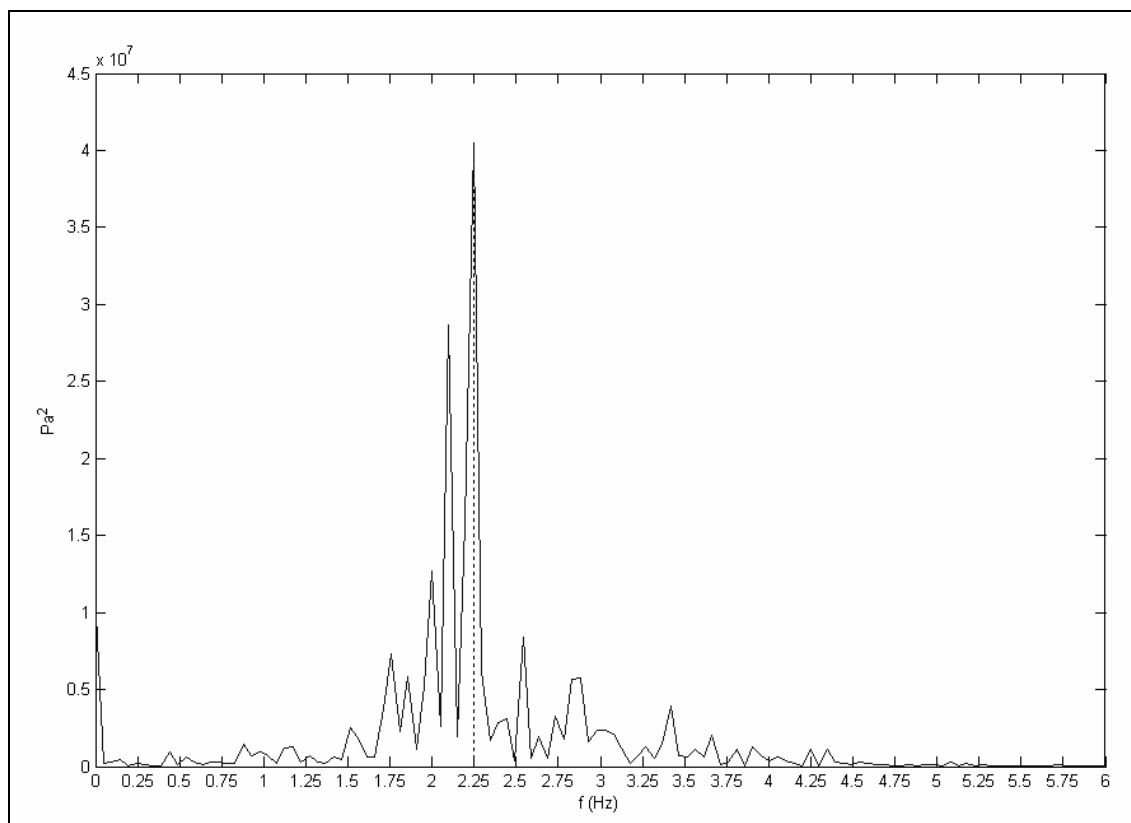


Figura 9.15. Espectro de Fourier de la presión. $Q=800\text{l/min}$. Punto de medida z_0

Como podemos observar, la frecuencia característica del lecho para la velocidad del gas elegida es 2.25Hz puesto que es la frecuencia predominante. Dada la forma de la transformada de Fourier (Jonson et al, 1997 [8]), se trata de un lecho burbujeante con múltiples burbujas porque no tenemos un pico único.

La frecuencia característica disminuye a medida que aumentamos el caudal puesto que las burbujas son más grandes y menos numerosas haciendo que el tiempo característico de las mismas sea mayor y por lo tanto la frecuencia menor.

10. CONCLUSIONES Y MEJORAS FUTURAS.



A lo largo del proyecto se han adquirido conocimientos acerca del fenómeno de la fluidización, se ha construido una instalación experimental y se han aplicado los conocimientos adquiridos en la caracterización experimental de dicha instalación. Concluyendo el estudio podemos enumerar las conclusiones y mejoras futuras que obtenemos de nuestra experiencia.

En cuanto a los conceptos teóricos consultados y los métodos experimentales utilizados obtenemos las siguientes conclusiones:

- Los métodos experimentales utilizados han demostrado ser de gran validez y fácil desarrollo e implantación.
- La obtención de la velocidad mínima de fluidización por el método experimental de la pérdida de carga es de gran utilidad aunque es un método que conlleva mayores errores que el método de la desviación típica ya que en el intervienen dos regiones, lecho fijo y lecho fluidizado, y la compleja región de transición entre ambas.
- La obtención de la velocidad mínima de fluidización aplicando el método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión es un método válido que aporta más exactitud que el método de la pérdida de carga.
- Es válida la obtención de la medida de presión en cualquier punto del lecho, e incluso en el plenum, para la aplicación de los métodos experimentales utilizados. Esto es debido a que las ondas de presión viajan a lo largo del lecho en ambas direcciones desde su punto de origen.
- El método de la desviación típica de las fluctuaciones de presión es más recomendado puesto es posible utilizarlo sin necesidad de defluidizar el lecho. Es posible operar el lecho a velocidad mínima de fluidización si pudiésemos controlar el rotámetro en función de la desviación típica instantánea de las desviaciones de presión. Su único inconveniente es que sólo se puede aplicar en lechos en los que la velocidad mínima de burbujeo coincida con la de mínima fluidización.
- El modelo de Davidson es válido para modelizar la fluctuación de presión que produce el paso de una burbuja por un punto en su ascenso por el lecho, aunque no están contemplados muchos otros fenómenos.

Respecto a nuestra experiencia en la toma de medidas así como los resultados obtenidos sobre las medidas de presión diferencial:

- La toma de medidas de presión diferencial ente dos puntos contiguos del lecho proporciona información local de los fenómenos ocurridos en dicho espacio. Además de los fenómenos característicos producidos en el lecho, el propio fundamento de la toma de presión diferencial hace que la medida se



vea perturbada por el paso de las burbujas por ambas sondas del sensor tal y como hemos comprobado mediante la aplicación del modelo de Davidson.

- Cuando tomamos medidas de presión diferencial es importante el espacio entre los puertos del sensor, ya que cuanto más distancia exista entre los mismos los fenómenos captados será más globales y viceversa, cuanto más pequeña sea la separación más locales serán los fenómenos.
- El método de la desviación típica (Puncochar et al, 1984), no es aplicable a medidas de presión diferencial ya que esta no es lineal con la velocidad del gas puesto que existe un cambio de pendiente a una determinada velocidad del mismo.
- Un aspecto negativo que presentan los lechos fluidos es la erosión que producen las partículas utilizadas. Para ello se deben utilizar materiales resistentes a la abrasión y realizar diseños que favorezca el movimiento de las partículas. Por ello es útil poder obtener las medidas en el plenum ya que no existen partículas en el mismo y por lo tanto evitamos problemas de erosión y obstrucción de las sondas.

En cuanto a la aparición de burbujas en el lecho obtenemos las siguientes conclusiones:

- En lechos estrechos es necesario estudiar la aparición de slugging para determinar la velocidad del gas a la que sucede y así poder evitarlo.
- El uso de herramientas frecuenciales (transformada de Fourier, funciones de correlación, etc.), puede ser útil en la caracterización de la dinámica de burbujas en el lecho.

Como desarrollo futuro se propone el estudio de la presión radial del lecho mediante un sensor óptico ya que empleando un medidor de presión obtendremos la media de lo que ocurre en la sección y no en cada punto de la misma.

11. BIBLIOGRAFÍA.



- [1] Daizo Kunii, Octave Levenspiel, FLUIDIZATION ENGINEERING Second Edition. Butterworth-Heinemann 1991.
- [2] J.F. Davidson, D. Harrison, FLUIDISED PARTICLES. Cambridge University Press 1963.
- [3] Martin Rhodes. INTRODUCTION TO PARTICLE TECHNOLOGY. John Wiley & Sons 1998.
- [4] M. Puncochar, J. Drahos, J. Cermak, K. Selucky, EVALUATION OF MINIMUM FLUIDIZING VELOCITY IN GAS FLUIDIZED BED FROM PRESSURE FLUCTUATIONS. Institute of Chemical Process Fundamentals 1984.
- [5] Derek Wilkinson. DETERMINATION OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY BY PRESSURE FLUCTUATION MEASUREMENT. The Canadian Journal of Chemical Engineering 1995.
- [6] J. R. Grace. EFFECT OF MEASUREMENT METHOD ON THE VELOCITIES USED TO DEMARCATHE THE ONSET OF TURBULENT FLUIDIZATION. The Chemical Engineering Journal 1994.
- [7] M. Puncochar, J. Drahos. ORIGIN OF PRESSURE FLUCTUATIONS IN FLUIDIZED BEDS. Chemical Engineering Science 2003.
- [8] F. Johnsson, R.C. Zijerveld, J. C. Schouten, C. M. van den Bleek, B. Leckner. CHARACTERIZATION OF FLUIDIZATION REGIMES BY TIME-SERIES ANALYSIS OF PRESSURE FLUCTUATIONS. International Journal of Multiphase Flow 1997.
- [9] Kozeny J. ÜBER KAPILLARE LEITUNG DES WASSERS IM BODEN. S.B.Akad. Wiss. Wien. 1927.
- [10] Carman P.C. FLUID FLOW THROUGH GRANULAR BEDS. Chem. Engrs. 1937.
- [11] Carman P.C. FLOW OF GASES THROUGH POROUS MEDIA. London Butterworths. 1956
- [12] Ergun S. FLUID FLOW THROUGH PACKED COLUMNS. Chem. Engng. 1952
- [13] Leva M. FLUIDIZATION. New York McGraw Hill. 1959
- [14] Zenz F.A. ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY. New York. Interscience. 1957.



- [15] Davies R.M. and Taylor. THE MECHANICS OF LARGE BUBBLES RISING THROUGH EXTENDED LIQUIDS AND THROUGH LIQUIDS IN TUBES. 1950
- [16] Clift R. And Grace J.R. FLUIDIZATION. 1985
- [17] Geldart. POWDER TECHNOL. 1973.
- [18] Verloop J. And Heertjes P.M. PERIOD PRESSURE FLUCTUATIONS IN FLUIDIZED BEDS. Chem. Eng. 1974
- [19] Furukawa J. And Ohman T. LIQUIDLIKE PROPERTIES OF FLUIDIZED SYSTEMS. Ing. Eng. 1958
- [20] Hiby J.W. Chem-Ing-Techm. 1964.
- [21] Darton R.C. et al. BUBBLE-GROWTH DUE TO COALESCENCE IN FLUIDIZED-BEDS. Chem. Eng. 1977.
- [22] ICP DAS PCI-1602 Hardware User's Manual
- [23] ICP DAS DB-1825 User's Manual
- [24] www.utc.fr/ergun/index.html Ergun Fluidization Software
- [25] www.setra.com Fabricante de transductores.
- [26] www.omega.com Fabricante de transductores.
- [27] www.dasylab.com Fabricante software de programación para comunicación PC-tarjeta de adquisición de datos.
- [28] www.icpdas.com Fabricante tarjeta de adquisición de datos

ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS.



DATOS PICNÓMETRO.

Pagina 1

AccuPyc 1330 V3.03
Numero de Serie: 3722
Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra:
Peso Muestra: 7.1386 g
Temperatura: 27.2 C
Numero de Purgas: 3
Volumen Celda: 11.4867 cm3

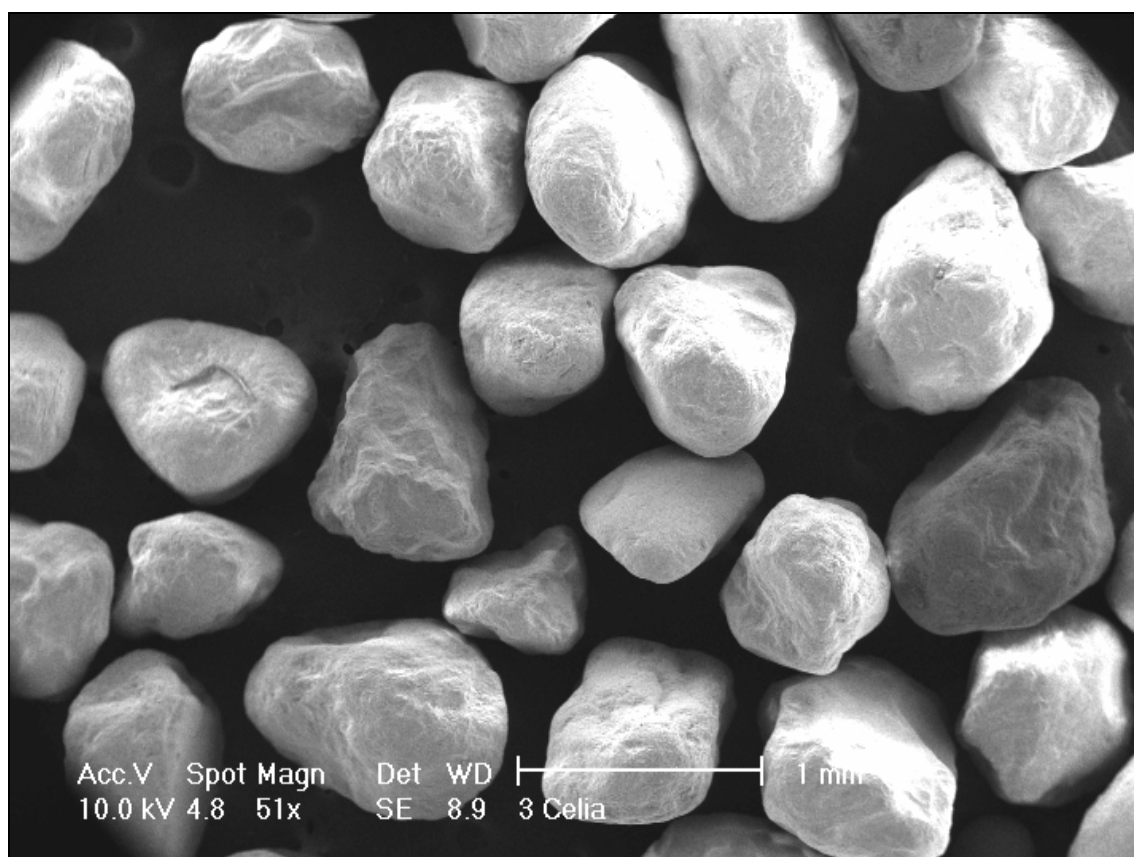
Comenzado: 17/01/07 18:16:14
Completado: 17/01/07 18:30:52
Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min
Volumen Expansion: 9.2858 cm3

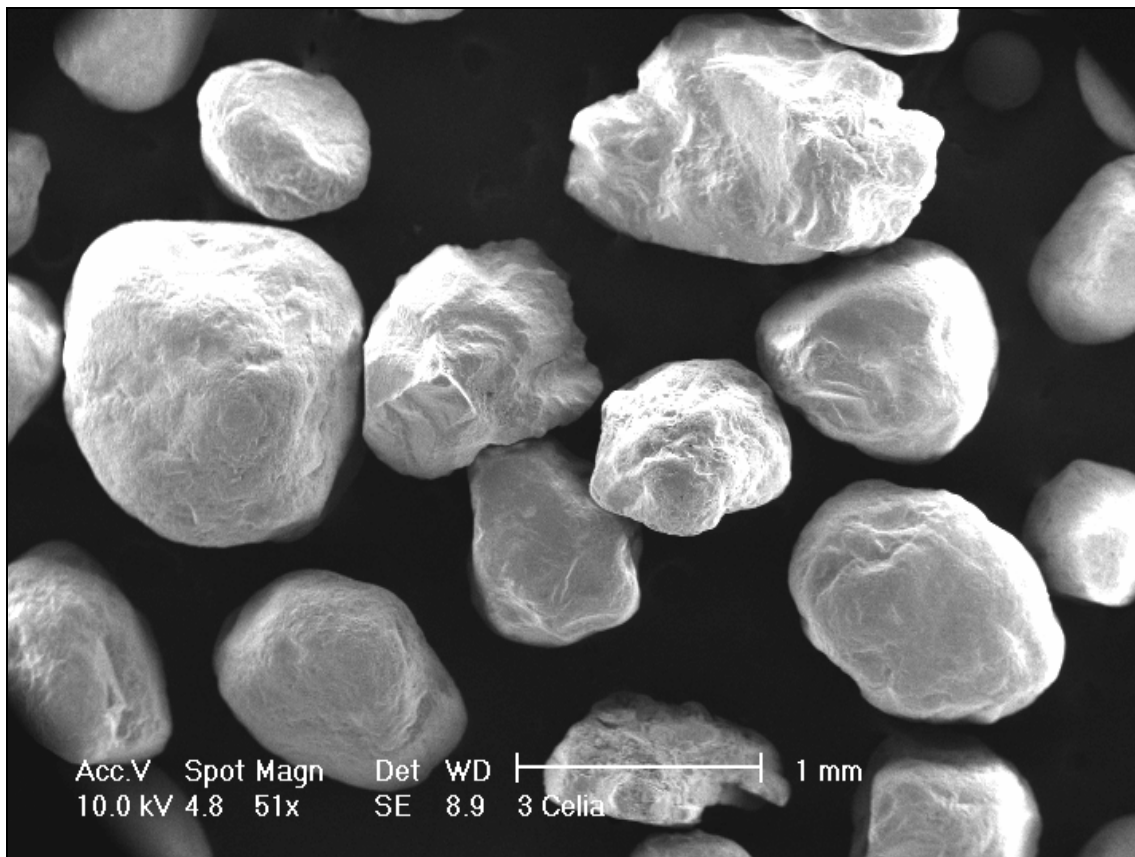
Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	2.6936	0.0008	2.6502	-0.0008	0:05:32
2	2.6932	0.0004	2.6506	-0.0004	0:07:42
3	2.6930	0.0002	2.6508	-0.0002	0:09:51
4	2.6909	-0.0018	2.6528	0.0018	0:12:22
5	2.6932	0.0004	2.6506	-0.0004	0:14:30

Volumen Promedio: 2.6928 cm3
Densidad Promedio: 2.6510 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0010 cm3
Desviacion Standard: 0.0010 g/cm3

MICROSCOPIAS DE ARENA DE SÍLICE.





TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

%CROMATOGRAFIA

```
% Escribo el directorio completo de la foto  
foto=strcat(dir,'CELIA1-1.tif');
```

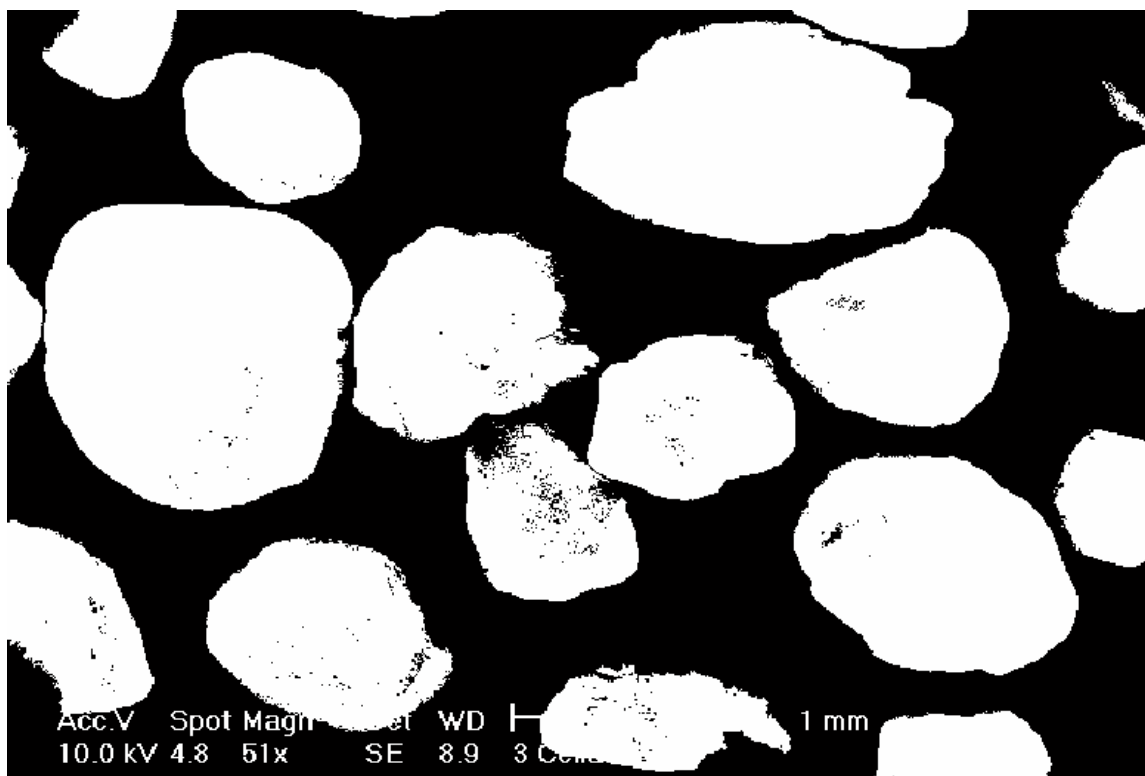
```
% La paso a una matriz de pixeles y la imprimo  
I=imread(foto);  
figure (1), imshow(I);
```

```
% Calculo el valor del threshold, paso la imagen a blanco y negro y la  
% imprimo  
level=graythresh(I);  
bw=im2bw(I,level);  
figure (2), imshow(bw)
```

```
% Con el siguiente comando selecciono la burbuja con el raton  
bw2=bwselect(bw);  
figure (3), imshow(bw2)
```

```
% Hago una limpieza quitando los puntos que quedan sueltos dentro de la  
% burbuja por las "estalactitas"  
bw3=imfill(bw2,'holes');  
figure (4), imshow(bw3)
```

```
L=bwlabel(bw3);  
propiedades=regionprops(L,'Centroid','Area','MajorAxisLength','MinorAxisLength','Eccentricity','Orientation','EquivDiameter');  
Area_m=propiedades.Area;  
A_m=propiedades.MajorAxisLength;  
B_m=propiedades.MinorAxisLength;  
Excen_m=propiedades.Eccentricity;  
Phi_m=propiedades.Orientation;  
Deq_m=propiedades.EquivDiameter;
```



ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS SENSORES Y TARJETA ADQUISICIÓN DATOS.

CARACTERÍSTICAS TRANSDUCTOR SETRA 267

Setra Systems Model 267 and 267MR pressure transducers sense gauge (static) or differential pressure and convert this pressure difference to a proportional electrical output. The 267 series is offered with a high level voltage output or 4-20 mA current output. The 267MR offers multi-range capability and field configurable 0-5 VDC or 0-10 VDC output, as well as a 4-20 mA output. The 267 is a single range unit and offers an optional LCD display. The 267 series has an IP65/NEMA 4 rated package to withstand environmental effects.

The 267 Series is available with an optional integral static pressure probe. Installation is quick and easy by mounting this version directly onto the duct. The 0.25" diameter pressure probe is made of sturdy extruded aluminum and is designed with baffles to prevent any velocity pressure errors.

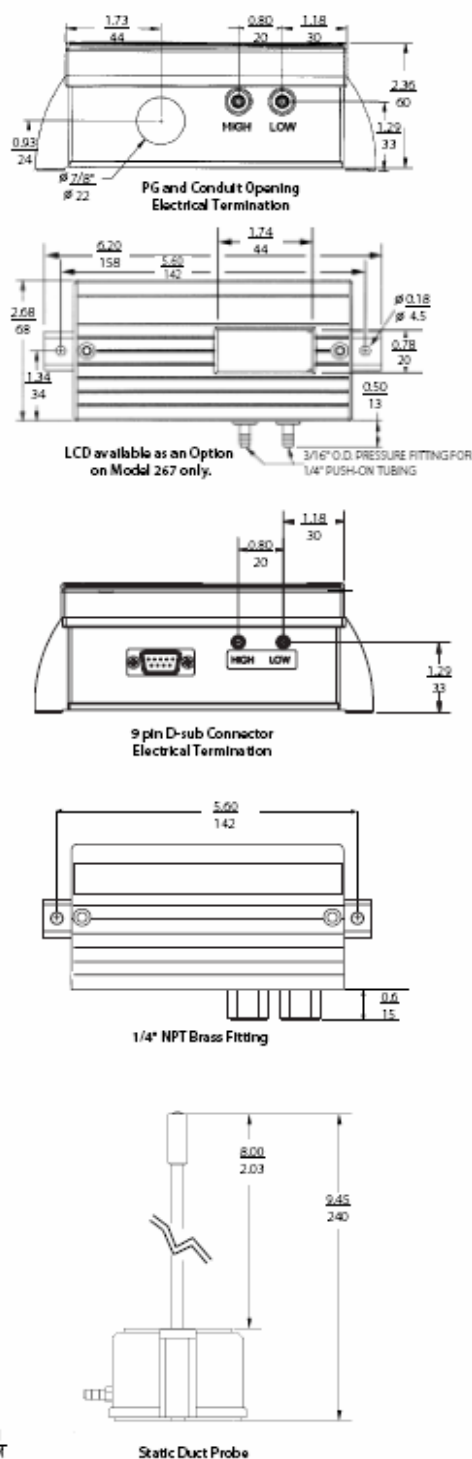
Used in Building Energy Management Systems, the 267 and 267MR pressure transducers are available for air pressure ranges as low as 0.1 in W.C. (25 Pa) full scale to 100 in. W.C. (25 kPa) full scale. Static accuracy is $\pm 1\%$ full scale in normal ambient temperature environments.

The 267 series utilizes an improved all stainless steel micro-tig welded sensor, which is enclosed in a welded stainless steel body. The tensioned stainless steel diaphragm and insulated stainless steel electrode, positioned close to the diaphragm, form a variable capacitor. As the pressure increases or decreases, the capacitance changes. The change in capacitance is detected and converted to a linear DC electrical signal by Setra's unique electronic circuit.

The micro-tig welded tension sensor allows up to 10 psi overpressure (in either direction), with no damage to the unit. The improved sensor design also allows the Model 267MR version to have 6 field selectable pressure ranges (bi-directional and unidirectional) in one unit. With minimal effort, the user can field calibrate the unit with a flip of a switch and be assured of optimum performance.

NOTE: Setra quality standards including ISO 9001 are based on ANSI-Z540.1. The calibration of this product is NIST traceable. U.S. Patent Nos. 4358814, 4434203, 4054833, 6019002, 6014800 and other patents pending.

Outline Drawings





Model 267 and 267MR Specifications



Model 267MR Multi-Range

Model 267w/LCD Display

Model 267w/Static Probe

Performance Data

	Standard	Optional
Accuracy RSS* (at constant temp.)	±1.0% FS	±0.4% FS
Non-Linearity (BFSL)	±0.98% FS	±0.38% FS
Hysteresis	0.10% FS	0.10% FS
Non-Repeatability	0.05% FS	0.05% FS

Thermal Effects**

Compensated Range °F(°C)	+40 to +150 (+5 to +65)
Zero/Span Shift %FS/°F(°C)	±0.033 (±0.06)
Maximum Line Pressure	10 PSI
Overpressure	10 PSI in Positive or Negative Direction
Warm-up Shift	±0.1% FS Total

Position Effect***

Range	Zero Offset (%FS/G)
To 0.5 in. WC	0.60
To 1.0 in. WC	0.50
To 2.5 in. WC	0.22
To 5.0 in. WC	0.14

*RSS of Non-Linearity, Non-Repeatability and Hysteresis.

**Units calibrated at nominal 70°F. Maximum thermal error computed from this datum.

***Unit is factory calibrated at 0g effect in the vertical position.

Physical Description

Case	IP65/NEMA 4 Plastic Glass-Filled Polycarbonate UL94V-0 Case
Electrical Connection	Screw Terminal Strip Inside of Case
Electrical Termination	PG-9/PG13.5 Strain Relief, 1/2" Conduit Opening, or 9 Pin D-Sub Connector*
Zero and Span Adjustment	Accessible Inside of Case
Display (Optional on 267 only)	3 1/2 Digit LCD Integral Display (1.74"W x 0.78"H)
Pressure Fittings	3/16" O.D. Barbed Brass for 1/4" Push-On Tubing (Standard) Static Pressure Probe (Optional) 1/4" NPTF Brass (Optional)
Mounting	2 Mounting Tabs with 0.18" Holes Pressure Probe Assembly is Supplied with a 7.8" 6061 Aluminum Alloy Probe and a Gasket to Seal Against the Duct
Weight (approx.)	9.0 ounces (255 grams) 9.5 ounces (Duct Probe Assembly)

*9 pin D-sub Connector is not suitable for NEMA4/IP-65 environments.

Electrical Data (Voltage)

Circuit	3-Wire (Exc, Gnd, Sig) Protected from Miswiring
Excitation (for 0-5 VDC Output)	9 to 30 VAC/12 to 40 VDC
Excitation (for 0-10 VDC Output)	11 to 30 VAC/13 to 40 VDC

Model 267

Output*	0 to 5 VDC** 0 to 10 VDC**
---------	-------------------------------

Model 267MR

Output* (Field Selectable)	0 to 5 VDC** 0 to 10 VDC**
Bidirectional Output at Zero	Mid-Range of Specified Output
Output Impedance	100 Ohms
Re-Ranging (267MR only)	5 Position Dtp Switches (Located Inside Case)

*Calibrated into a 50K ohm load, operable into a 5000 ohm load or greater.
**Zero output factory set to within ±50mV (±25 mV for optional accuracies).
Span (Full Scale) output factory set to within ±50mV (±25 mV for optional accuracies).

Electrical Data (Current)

Circuit	2-Wire Protected from Miswiring
Output*	4 to 20 mA**
Bidirectional Output at Zero	12 mA
External Load	0 to 800 Ohms
Minimum loop supply voltage (VDC) = 9 + 0.02 x (Resistance of receiver plus line).	
Maximum loop supply voltage (VDC) = 30 + 0.004 x (Resistance of receiver plus line).	
Re-Ranging (267MR only)	4 Position Dtp Switches (Located Inside Case)

*Calibrated with a 24 VDC loop supply voltage and a 250 ohm load.
**Zero output factory set to within ±0.16mA (±0.08 mA for optional accuracies).
Span (Full Scale) output factory set to within ±0.16mA (±0.08 mA for optional accuracies).

Pressure Media

Typically Air or Similar Non-Conducting Gases.

Environmental Data

Temperature	
Operating* °F (°C)	0 to +150 (-18 to +65)
Storage °F (°C)	-65 to +180 (-54 to +82)

*Operating temperature limits of the electronics only.

Pressure media temperature may be considerably higher or lower.

Application of some available options may impact standard specifications. Specifications are subject to change without notice.

Applications

- Heating, Ventilating and Air-Conditioning (HVAC)
- Energy Management Systems
- Static Duct Pressure
- Clean Room Pressure
- Oven Pressurization and Furnace Draft Controls

Features

- Model 267MR Offers Multi-Range Capability, 6 Field Selectable Ranges via Dip Switches, and Field Selectable 0-5 or 0-10 VDC Output
- Model 267 Offers an Optional 3 1/2 Digit LCD Display with a 0.5% FS Standard Accuracy
- NEMA 4/IP65 Rated Housing
- Optional Accuracies as High as 0.25% FS
- 24 VAC or 24 VDC Excitation
- PG-9, PG13.5 or Conduit Electrical Termination
- Integral Static Pressure Probe
- Ranges as low as 0.1 in. W.C. (25 Pa)
- Meets CE Conformance Standards



Visit Setra Online:
<http://www.setra.com>

setra
800-257-3872



ORDERING INFORMATION

Model 267 Pressure Transducer

Code all blocks in table.

Example: Part No. 2671R25WD11G2CD for a 0 to 25 in. WC Unidirectional
Range, 4-20 mA Output, 3/16" Barbed Brass Fitting, PG-9 Electrical Termination, 1% Accuracy with LCD Display

Model	Pressure Ranges in. W.C.	Units W = in. WC L = Pascal	Type D = Unidirectional B = Bidirectional	Output 11 = 4-20 mA 20 = 0-5 VDC 2E = 0-10 VDC	Pressure Fitting/ Elec. Termination (Choose the proper electrical termination code under the pressure fitting ordered.)	Accuracy C = $\pm 1.0\%$ FS <u>Optional (w/Cal. Cert.)</u> E = $\pm 0.4\%$ FS F = $\pm 0.25\%$ FS G = $\pm 1\%$ FS H = $\pm 0.5\%$ FS	Display D = LCD Display N = No Display
2671 = 267	OR1 = 0 to 0.1 ± 0.1 R25 = 0 to 0.25 ± 0.25 OR5 = 0 to 0.5 ± 0.5 001 = 0 to 1 ± 1 1R5 = 0 to 1.5 ± 1.5 2R5 = 0 to 2.5 ± 2.5 005 = 0 to 5 ± 5 010 = 0 to 10 ± 10 025 = 0 to 25 ± 25 050 = 0 to 50 ± 50 100 = 0 to 100 ± 100 Pascals 025 = 0 to 25 ± 25 050 = 0 to 50 ± 50 100 = 0 to 100 ± 100 250 = 0 to 250 ± 250 500 = 0 to 500 ± 500 10C = 0 to 1000 ± 1000 25C = 0 to 2500 ± 2500 40C = 0 to 4000 ± 4000 70C = 0 to 7000 ± 7000				1/4" NPT F, Brass Optional Fitting 1K = PG-9 Strain Relief 2K = PG 13.5 Strain Relief 9K = 9 pin D-sub Connector AK = 1/2" Conduit Opening 3/16" Barbed Brass Standard Fitting G1 = PG-9 Strain Relief G2 = PG 13.5 Strain Relief D9 = 9 pin D-sub Connector A1 = 1/2" Conduit Opening Static Duct Probe Optional Fitting 1P = PG-9 Strain Relief 2P = PG 13.5 Strain Relief 9P = 9 pin D-sub Connector AP = 1/2" Conduit Opening		

1.) $\pm 0.5\%$ FS (Code: H) accuracy is standard when ordered with the LCD display (Code: D).

Model 267MR Pressure Transducer

Model	Pressure Ranges in. W.C.	Units W = in. WC L = Pascal	Type D = Differential	Output 11 = 4-20 mA 20 = 0-5 VDC 2E = 0-10 VDC	Pressure Fitting/ Elec. Termination (Choose the proper electrical termination code under the pressure fitting ordered.)	Accuracy C = $\pm 1.0\%$ FS <u>Optional (w/Cal. Cert.)</u> G = $\pm 1.0\%$ FS	Display N = No Display
2671 = 267	MR1 = 0 to 0.1 ± 0.05 MR2 = 0 to 0.25 ± 0.125 0 to 0.5 ± 0.25 0 to 1 ± 0.5 MR3 = 0 to 1.25 ± 0.625 0 to 2.5 ± 1.25 0 to 5.0 ± 2.5 MR4 = 0 to 7.5 ± 3.75 0 to 15 ± 7.5 0 to 30 ± 15 Pascals MR5 = 0 to 25 ± 12.5 MR6 = 0 to 50 ± 25 0 to 100 ± 50 0 to 200 ± 100 MR7 = 0 to 250 ± 125 0 to 500 ± 250 0 to 1000 ± 500 MR8 = 0 to 625 ± 312 0 to 1250 ± 625 0 to 2500 ± 1250 MR9 = 0 to 1875 ± 937 0 to 3750 ± 1875 0 to 7500 ± 3750				1/4" NPT F, Brass Optional Fitting 1K = PG-9 Strain Relief 2K = PG 13.5 Strain Relief 9K = 9 pin D-sub Connector AK = 1/2" Conduit Opening 3/16" Barbed Brass Standard Fitting G1 = PG-9 Strain Relief G2 = PG 13.5 Strain Relief D9 = 9 pin D-sub Connector A1 = 1/2" Conduit Opening Static Duct Probe Optional Fitting 1P = PG-9 Strain Relief 2P = PG 13.5 Strain Relief 9P = 9 pin D-sub Connector AP = 1/2" Conduit Opening		

Ranges are factory set for the highest range.

Optional higher accuracies are not available on the 267MR.

While we provide application assistance on all Setra products both personally and through our literature, it is the customer's responsibility to determine the suitability of the product in the application.

159 Swanson Road, Boxborough, Massachusetts 01719/Tel: 800-257-3872;
Fax: 978-264-0292; Email: sales@setra.com; Web: www.setra.com

setra

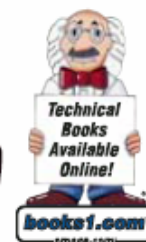


CARACTERÍSTICAS TRANSDUCTOR OMEGA PX291

HVAC STYLE LOW DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTERS

PX291 Series
0-0.1 inH₂O to 0-30 psid
0-25 Pa to 0-2 bar

Starts at
\$180



PX291-001WDI, \$210, shown smaller than actual size.

Applications:

- ✓ Drop Across Filters
- ✓ Static Fan Pressures
- ✓ Clean Room Pressures
- ✓ Variable Volume Air Systems
- ✓ Velocity Pressures

- ✓ Voltage or Current Outputs
- ✓ Low Power Consumption
- ✓ No Moving Parts to Wear
- ✓ Position Insensitive

- ✓ Reliable Long-Term Stability
- ✓ Rugged Flame-Retardant Case

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

To Order (Specify Model Number)							
RANGE		5 Vdc OUTPUT	PRICE	4 TO 20 mA OUTPUT	PRICE	MAX* OVERPRESSURE	COMPATIBLE METERS**
0 to 0.1 inH ₂ O	0 to 25.0 Pa	PX291-0.1WD5V	\$220	PX291-0.1WDI	\$220	5 inH ₂ O 1.25 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 0.2 inH ₂ O	0 to 50.0 Pa	PX291-0.2WD5V	210	PX291-0.2WDI	210	5 inH ₂ O 1.25 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 0.3 inH ₂ O	0 to 75.0 Pa	PX291-0.3WD5V	210	PX291-0.3WDI	210	5 inH ₂ O 1.25 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 0.5 inH ₂ O	0 to 125.0 Pa	PX291-0.5WD5V	210	PX291-0.5WDI	210	5 inH ₂ O 1.25 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 1.0 inH ₂ O	0 to 249.0 Pa	PX291-001WD5V	210	PX291-001WDI	210	20 inH ₂ O 4.98 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 2.0 inH ₂ O	0 to 498.0 Pa	PX291-002WD5V	180	PX291-002WDI	180	20 inH ₂ O 4.98 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 3.0 inH ₂ O	0 to 748.0 Pa	PX291-003WD5V	180	PX291-003WDI	180	20 inH ₂ O 4.98 kPa	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 5.0 inH ₂ O	0 to 1.25 kPa	PX291-005WD5V	180	PX291-005WDI	180	5 psid 0.34 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 10.0 inH ₂ O	0 to 2.49 kPa	PX291-010WD5V	180	PX291-010WDI	180	5 psid 0.34 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 20.0 inH ₂ O	0 to 4.98 kPa	PX291-020WD5V	180	PX291-020WDI	180	5 psid 0.34 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 30.0 inH ₂ O	0 to 7.47 kPa	PX291-030WD5V	180	PX291-030WDI	180	5 psid 0.34 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 50.0 inH ₂ O	0 to 12.5 kPa	PX291-050WD5V	180	PX291-050WDI	180	15 psid 1.0 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 100.0 inH ₂ O	0 to 24.9 kPa	PX291-100WD5V	180	PX291-100WDI	180	15 psid 1.0 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 1.0 psid	0 to 0.07 bar	PX291-001D5V	180	PX291-001DI	180	15 psid 1.0 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 2.0 psid	0 to 0.14 bar	PX291-002D5V	180	PX291-002DI	180	15 psid 1.0 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 5.0 psid	0 to 0.34 bar	PX291-005D5V	180	PX291-005DI	180	15 psid 1.0 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 15.0 psid	0 to 1.0 bar	PX291-015D5V	180	PX291-015DI	180	30 psid 2.1 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E
0 to 30.0 psid	0 to 2.1 bar	PX291-030D5V	180	PX291-030DI	180	60 psid 4.1 bar	DP41-E, DP25B-E, DP24-E

Comes with complete operator's manual.

* Maximum momentary overpressure.

** See section D for compatible meters.

Note: See specifications for description of the elevated zero option, \$20 additional.

Ordering Examples: PX291-001WD5V, range of 1.00 inH₂O at 5 Vdc and 0 differential pressure at 0 Vdc, \$210. PX291-001WD5V-A, range of 1.00 inH₂O at 5 Vdc and -0.33 inH₂O at 0 Vdc, \$210 + \$20 = \$230. PX291-001WDI, range of 1.00 inH₂O at 20 mA and 0 differential pressure at 4 mA, \$210. PX291-001WDI-A, range of 1.00 inH₂O at 20 mA and -0.33 inH₂O at 4 mA, \$210 + \$20 = \$230.

ACCESSORY

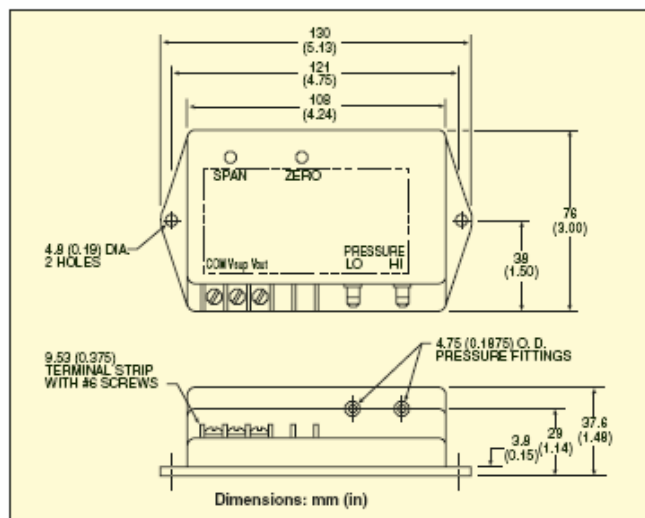
MODEL NO.	PRICE	DESCRIPTION
EE-2590	\$190	Reference Book: Measurement Instrumentation and Sensors Handbook

B-181

0 TO 5 Vdc OR 4 TO 20 mA OUTPUTS ZERO OFFSET

The PX291 Series of differential pressure transmitters is designed to measure low pressures while using little power. A selection of ranges is available to meet most industrial and laboratory applications.

The transmitters are housed in a flame-retardant, glass-reinforced polyphenylene oxide case. Electrical connections are made by means of a $\frac{1}{2}$ " terminal with #6 screws. There are no moving parts and the transducers are virtually position insensitive. The span and zero settings are made via 20-turn potentiometers, for easy and precise adjustments. The pressure sensing element is a differential capacitive cell for the low pressure ranges from 0.1 to 5 inH₂O and a piezoresistive chip for ranges above 5 inH₂O. Both sensors ensure reliability and long-term stability.



DIFFERENTIAL
PRESSURE TRANSDUCERS
B

SPECIFICATIONS

General: Measures differential, gage pressure or vacuum

Excitation: 11 to 32 Vdc reverse polarity protected

Voltage Output Models:
0 to 5 Vdc 3-wire, source or sink
3.5 mA, short circuit protected,
current draw = 10 mA

Current Output Models:
4 to 20 mA, output limited to
approximately 3.85 mA at low end and
25 mA at high end

Maximum Current Loop Resistance:
 $R_L = (V_S - 11) \times 50$

Accuracy: $\pm 1\%$ Includes linearity,
hysteresis

Calibration: NIST-traceable

Operating Temperature:
0 to 45°C (32 to 115°F)

Temperature Effects:

Zero: $\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$

Span: $\pm 0.02\%/^{\circ}\text{C}$

Operating Humidity Range:

10 to 90% non-condensing

Shock Resistance: 10 g (11 ms)

Vibration Resistance: 5 g to 50 Hz

Overpressure: See order chart for
maximum safe momentary overpressure

Media Compatibility: Suitable for air or
inert gas

Pressure Connection: $\frac{1}{4}$ " Dia. tube
connections with integral filters at both
ports, suitable for $\frac{1}{4}$ " ID Tygon® or
polyurethane tubing (3 to 4 mm) or
 $\frac{1}{4}$ " OD polyethylene tubing (6 mm)

Electrical Connection: External $\frac{1}{2}$ "
terminal strip with #6 screws

Case Material: Flame-retardant,
glass-reinforced polyphenylene oxide

Dimensions: 36 H x 76 W x 131 mm L
(1.4H x 3.0W x 5.15"L)

Weight: 190 g (6.72 oz)

OFFSET OPTIONS

If the measured differential pressure
is expected to go from positive to
negative, a transducer with offset
(elevated zero) should be ordered.
The standard models in the order
chart have no offset (i.e., at zero
differential pressure, the output is
0 Vdc or 4 mA).

2 offset options are available:

"A" $\frac{1}{4}$ Span Offset

At zero differential pressure,
the output is 1.25 Vdc or 8 mA
allowable pressure excursion:
-33% to 100% of range

"B" $\frac{1}{2}$ Span Offset

At zero differential pressure,
the output is 2.5 Vdc or 12 mA
allowable pressure excursion:
-100% to 100% of range

Examples: PX291-001WD5V-A
will have a range of 1" water at
5 Vdc and -0.33" water at 0 Vdc

PX291-001WDI-B will have a
range of +1" water at 20 mA
and -1" water at 4 mA

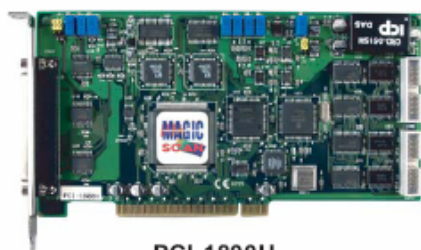
CARACTERÍSTICAS TARJETA ADQUISICIÓN DE DATOS

PCI Multi-Function DAQ Board

PCI-180X/1602/1202

12/16-bit high performance multi-function DAQ boards

2 PCI Bus I/O Boards



PCI-1800H

Features

- 32-bit +5V PCI Bus, Plug & Play
- 12/16-bit resolution
- Up to 330KS/s sampling rate
- Single-ended or differential analog input
- On-board FIFOs
- Software programmable gain
- Two 12-bit independent programmable DAC
- 16 digital input / 16 digital output channels

Functional Description

The PCI-180X series is a family of high performance data acquisition board for PC with PCI bus. It features a continuous, 330KHz, gap-free data acquisition under DOS and Windows. This family has the same architecture: one 12-bit 330KHz A/D converter, two 12-bit independent D/A converters, 16-channel digital input and 16-channel digital output. The PCI-1800H/L provides 16-channel single-ended or 8-channel differential analog input. The PCI-1802H/L provides 32 channel single-ended or 16-channel differential analog input. The -H means high gain mode and the -L means low gain mode. Two DACs of the multifunction card are independent bipolar voltage output with jumper selectable voltage output range.

The scan function of PCI-180X is so amazing. We call it "MAGIC SCAN". It scans with two modes: "Fix channel scan" and "Variable channel scan". The "Magic scan" mechanism not only scan the different input channels at vastly different rates, but also at different gain. Even in multi-channel scan, both modes can be up to 330K samples per second.

The PCI-180X series also has other outstanding features. For example:

1. The data transfer rate of digital I/O is up to 2.1 M words/second (non-burst mode).
2. The throughput of D/A is up to 2.1MHz throughput max.
3. Provides three flexible external trigger modes, such as post-trigger, pre-trigger, middle trigger.
4. Provides M-function and Continue Capture function.

The PCI-1202H/L is very similar to PCI-1802H/L. The different items between the PCI-1802 and PCI-1202 are given as follows:

- A/D sampling rate is 110K samples/second for PCI-1202.
- FIFOs size is 1K samples for PCI-1202.

The PCI-1602 is very similar to PCI-1802L. The

different items between the PCI-1802 and PCI-1602 are given as follows:

- 16-bit A/D converter
- A/D sampling rate is 200K sample/second for PCI-1602F.
- A/D sampling rate is 100K sample/second for PCI-1602.

Applications

- High speed data acquisition system
- Process monitor and control
- Vibration analysis
- Digital pattern generator from digital I/O port
- Continue data capture

"MAGIC SCAN" Function

The "MAGIC SCAN" controller is a innovative design. It has the following features:

1. Different gain for each scan channel
2. Non-sequential order for channel scan
3. Different sampling rate for each scan channel
4. Programmable different digital filter for each scan channel
5. Programmable high/ low alarm function, provide four different alarm monitor mode for each scan channel
6. The scan sampling rate can maintain at max. sampling rates without sacrifice the speed
7. Provide three external trigger: Pre-trigger, Post-trigger, Middle-trigger
8. Easy programming

The PCI-1800 can measure the high frequency signal and low frequency signal with different sampling rate. In other words, the user doesn't have to waste valuable data memory for low speed channel. It can measure small signal and large signal at the same time. The digital filter can filter out some noisy signal. The programmable high/ low alarm function will be very helpful for some monitor application system.

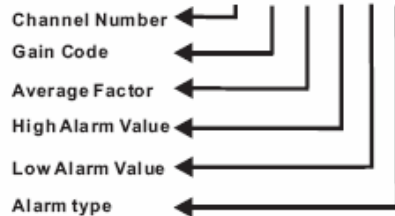
PCI Multi-Function DAQ Board

PCI-180X/1602/1202

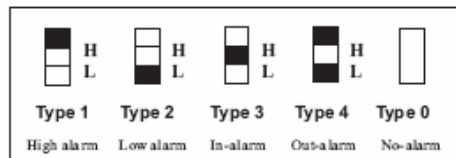
12/16-bit high performance multi-function DAQ boards

The Format of Function Call

P180X_Add To Scan (N, G, AF, H, L, A)



Alarm type



M_Function

M_Function is used to support simultaneous gap-free A/D, D/A at full-rated throughput. The user can use the D/A channel to send out the pre-defined signal pattern to the external device and measure the output signal simultaneously. The M_Function can be executed under DOS, Windows and Linux. Some programming language (VC/C++, BC++, VB, Delphi), Java and package (LabVIEW) can call the M_Function.

Continue Capture Function

The PCI-180X/1602/1202 provide different continuously capture functions.

1. Continuous Capture at Low speed. The acquired data can be display at the monitor simultaneously. No storage is required. Therefore the user can monitor the data continually.
2. Continuous Capture at high speed. The acquired data should be saved into the DRAM of PC. The capture period should be limited to the Memory size.
3. Continuous Capture at high speed. The acquired data should be saved into the SRAM card of PC. The capture period should be limited to the Memory size. The user should have to calculate the memory size according to the sampling rate and the capture period.

The Continue Capture function can be executed under DOS, Windows and Linux. Continuous Capture function can support multiple boards.

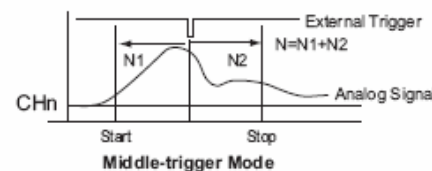
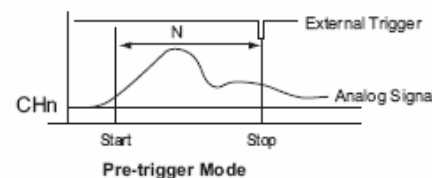
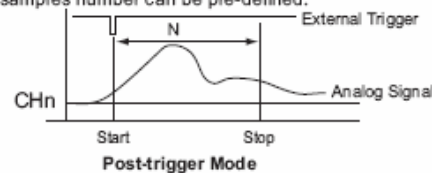
FIFO Size

How many FIFOs is large enough for your application? It depends on your application. You can calculate the time buffer using the following formula. For example, the FIFO size of PCI-1800 is 1K samples. The maximum Sampling rate of the board is 330KS/s. The time buffer you can get is 1K Samples (FIFO Size) / 330K Samples/s = 3.03ms. It is enough for regular application under the DOS. For some complicated multi-tasking applications, the user have to know the FIFO size he needs; otherwise the data might be lost. The PCI-1800 series provide the possibility to upgrade the FIFO size.

Diverse Trigger Mode

PCI-180X series provide diverse internal and external trigger modes. The internal trigger includes software trigger and pacer timer trigger. The external trigger includes the following trigger modes.

- **Post-trigger mode:** Acquisition begins after an external trigger and continues until the specified number of samples are collected.
- **Pre-trigger mode:** Acquisition occurs before an external trigger occurs.
- **Middle-trigger mode:** Acquisition occurs before and after an external trigger occurs. The samples number can be pre-defined.

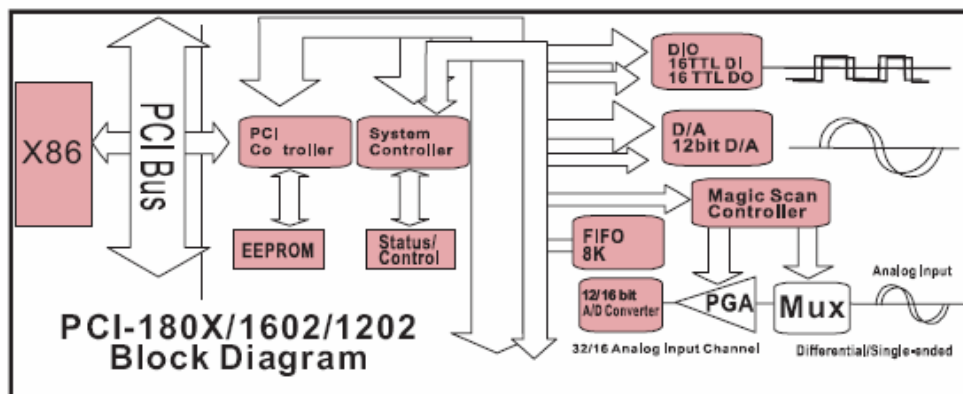


PCI Multi-Function DAQ Board

PCI-180X/1602/1202

12/16-bit high performance multi-function DAQ boards

2 PCI Bus I/O Boards



Specifications

Analog Input

- Number of channels:
 - PCI-1802/1602/1202: 32 single-ended or 16 differential
 - PCI-1800: 16 single-ended or 8 differential
- Resolution: PCI-1802/1800/1202: 12-bit
PCI-1602: 16-bit
- ADC conversion rate: PCI-1802/1800: 330 KS/s
PCI-1602F: 200 KS/s
PCI-1602: 100 KS/s
PCI-1202: 110 KS/s
- Input impedance: 10,000 M Ω //6pF
- Over voltage protection: $\pm 35V$
- Accuracy: 0.01 % of reading, ± 1 bit
- Linearity: ± 1 bit
- On chip sample & hold
- FIFO size: PCI-1202/1800: 1K samples (option 8K)
PCI-1802/1602: 8K samples

PCI-1602 Input Range

Gain	Bipolar	PCI-1602F Sampling Rate(Max.)	PCI-1602 Sampling Rate(Max.)
1	$\pm 10V$	200KS/s	100KS/s
2	$\pm 5V$	200KS/s	100KS/s
4	$\pm 2.5V$	200KS/s	100KS/s
8	$\pm 1.25V$	200KS/s	100KS/s

PCI-1800H/1802H/1202H Input Range

Gain	Bipolar	Unipolar	Sampling Rate(Max.)
0.5	± 10	X	44KS/s
1	± 5	0~10	44KS/s
5	± 1	X	36KS/s
10	± 0.5	0~1	36KS/s
50	± 0.1	X	7KS/s
100	± 0.05	0~0.1	7KS/s
500	± 0.01	X	0.8KS/s
1000	± 0.005	0~0.01	0.8KS/s

PCI-1800L/1802L/1202L Input Range

Gain	Bipolar	Unipolar	Sampling Rate(Max.)	
			180X	1202
0.5	± 10	X	330KS/s	110KS/s
1	± 5	0~10	330KS/s	110KS/s
2	± 2.5	0~5	330KS/s	110KS/s
4	± 1.25	0~2.5	330KS/s	110KS/s
8	± 0.625	0~1.25	330KS/s	110KS/s

Analog Output

- Number of channels: 2 independent
- Type: 12-bit double buffered
- Linearity: 0.006% FS
- Settling time: 0.4 μ S
- Output range: -5V~5V or -10V~10V
- Output Driving: ± 5 mA

Timer

- Three 16-bit independent timer, 8MHz input clock
- Timer 0: Internal pacer trigger timer
- Timer 1: External pacer trigger
- Timer 2: Machine independent timer for settling time delay

Digital I/O

- 16 TTL-level input
- Input low $V_{IL} = 0.8V$ max; $I_{IL} = -0.4mA$ max
- Input high $V_{IH} = 2.0V$ min; $I_{IH} = 20 \mu A$ max
- 16 TTL-level output
- Output low $V_{OL} = 0.5V$ max; $@I_{OL} = 8$ mA max
- Output high $V_{OH} = 2.7V$ min; $@I_{OH} = 0.4$ mA max

General Specifications

- I/O connector: one 37-pin D-Sub female
two 20-pin ribbon male

Power requirements:

Device	PCI-180X	PCI-1602	PCI-1202
+5V	1600 mA	1200 mA	1400 mA

- Operating temperature: 0 ~ 60°C
- Operating humidity: 0 ~ 90% non-condensing
- Storage temperature: -20 ~ 70°C
- Dimensions: 200 mm x 105 mm (PCI-180X)
205 mm x 105 mm (PCI-1202 / 1602)

PCI Multi-Function DAQ Board

PCI-180X/1602/1202

12/16-bit high performance multi-function DAQ boards



PCI-1602



PCI-1202H

DN-37	DIN-rail mounting terminal board
DB-37	Directly connection terminal board
DN-20:	DIN-rail mounting terminal board
DB-16P:	16-channel isolated digital input board
DB-16R:	16-channel SPDT relay board
ADP-20/PCI:	20-pin extender

Pin Assignment

CON1										CON2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
DO0	1		2	DO1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1		2	DI1	1	

ANEXO 3: PROGRAMAS.



VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN DATOS EXPERIMENTALES

%MINIMA FLUIDIZACION METODOS EXPERIMENTALES

%DATOS

D=0.15; %Diametro del lecho

M=6; %Masa de las particulas contenidas en el lecho

g=9.8;

%FUNCION DE TRANSDUCCIÓN PARA PASAR A VALORS DE PRESION

%TRANSDUCTOR TIPO 1 10" (TRANSDUCTORES 1-2-3)(CANALES 3, 4 Y 5)

A1=500;

B1=-25;

%TRANSDUCTOR TIPO 2 30" (TRANSDUCTORES 4-5)(CANALES 1 Y 2)

A2=1500;

%Lectura de datos de tension (V) para los distintos caudales (1000-0 L/min)

VP_Q1200=dlmread('PFC_Q1200.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q1100=dlmread('PFC_Q1100.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q1000=dlmread('PFC_Q1000.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q900=dlmread('PFC_Q900.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q800=dlmread('PFC_Q800.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q700=dlmread('PFC_Q700.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q600=dlmread('PFC_Q600.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q500=dlmread('PFC_Q500.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q400=dlmread('PFC_Q400.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q300=dlmread('PFC_Q300.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q250=dlmread('PFC_Q250.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q200=dlmread('PFC_Q200.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q150=dlmread('PFC_Q150.ASC','t','B13..F60044');

VP_Q100=dlmread('PFC_Q100.ASC','t','B13..F60044');

%vector de caudales

Q=[1200 1100 1000 900 800 700 600 500 400 300 250 200 150 100];

% VECTOR DE VELOCIDADES

%Area

A=pi*D^2/4;

U=Q./(A*6e4);

%UF=0.4;

%U=U/UF;

%CALCULO DE Pmed PARA CADA CAUDAL

VPMED_Q1200=mean(VP_Q1200);

VPMED_Q1100=mean(VP_Q1100);

VPMED_Q1000=mean(VP_Q1000);

VPMED_Q900=mean(VP_Q900);

VPMED_Q800=mean(VP_Q800);

VPMED_Q700=mean(VP_Q700);



```
VPMED_Q600=mean(VP_Q600);  
VPMED_Q500=mean(VP_Q500);  
VPMED_Q400=mean(VP_Q400);  
VPMED_Q300=mean(VP_Q300);  
VPMED_Q250=mean(VP_Q250);  
VPMED_Q200=mean(VP_Q200);  
VPMED_Q150=mean(VP_Q150);  
VPMED_Q100=mean(VP_Q100);
```

```
VPMED=[VPMED_Q1200; VPMED_Q1100; VPMED_Q1000; VPMED_Q900;  
VPMED_Q800; VPMED_Q700; VPMED_Q600; VPMED_Q500; VPMED_Q400;  
VPMED_Q300; VPMED_Q250; VPMED_Q200; VPMED_Q150; VPMED_Q100];
```

%TRANSFORMACION DE TENSION A PRESION PARA LA PRESION MEDIA

```
PMED=VPMED;
```

```
for i=1:14
```

```
    for j=1:5
```

```
        if j==1
```

```
            PMED(i,j)=PMED(i,j).*A2;
```

```
        else if j==2
```

```
            PMED(i,j)=PMED(i,j).*A2;
```

```
        else
```

```
            PMED(i,j)=PMED(i,j).*A1+B1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

%CALCULO DE LA DESVIACION TIPICA

```
VSTD_Q1200=std(VP_Q1200);  
VSTD_Q1100=std(VP_Q1100);  
VSTD_Q1000=std(VP_Q1000);  
VSTD_Q900=std(VP_Q900);  
VSTD_Q800=std(VP_Q800);  
VSTD_Q700=std(VP_Q700);  
VSTD_Q600=std(VP_Q600);  
VSTD_Q500=std(VP_Q500);  
VSTD_Q400=std(VP_Q400);  
VSTD_Q300=std(VP_Q300);  
VSTD_Q250=std(VP_Q250);  
VSTD_Q200=std(VP_Q200);  
VSTD_Q150=std(VP_Q150);  
VSTD_Q100=std(VP_Q100);
```



```
VSTD=[VSTD_Q1200; VSTD_Q1100; VSTD_Q1000; VSTD_Q900; VSTD_Q800;  
VSTD_Q700; VSTD_Q600; VSTD_Q500; VSTD_Q400; VSTD_Q300; VSTD_Q250;  
VSTD_Q200; VSTD_Q150; VSTD_Q100];
```

```
%TRANSFORMACION DE TENSION A PRESION PARA LA DESVIACION  
TIPICA
```

```
STD=VSTD;
```

```
for i=1:14
```

```
    for j=1:5
```

```
        if j==1
```

```
            STD(i,j)=STD(i,j).*A2;
```

```
        else if j==2
```

```
            STD(i,j)=STD(i,j).*A2;
```

```
        else
```

```
            STD(i,j)=STD(i,j).*A1;%porque para obtener presion la constante al operar  
desaparece
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
%TRANSFORMACION DE TENSION A PRESION PARA LA DESVIACION  
TIPICA
```

```
UX=U(1:9);
```

```
STDX=STD(1:9,:);
```

```
CC1=CORRCOEUF(UX,STDX(:,1));
```

```
CC2=CORRCOEUF(UX,STDX(:,2));
```

```
CC3=CORRCOEUF(UX,STDX(:,3));
```

```
CC4=CORRCOEUF(UX,STDX(:,4));
```

```
CC5=CORRCOEUF(UX,STDX(:,5));
```

```
COEFCORR=[CC1(1,2); CC2(1,2); CC3(1,2); CC4(1,2); CC5(1,2)]
```

```
%REGRESION DE LAS DESVICIONES TIPICAS DE LA PRESION MEDIANTE  
UN POLINOMIO
```

```
%DE GRADO 1
```

```
%CALCULO DE LOS COEFICIENTES DEL POLINOMIO
```

```
POLI1=polyfit(UX',STDX(:,1),1);
```

```
POLI2=polyfit(UX',STDX(:,2),1);
```

```
POLI3=polyfit(UX',STDX(:,3),1);
```

```
POLI4=polyfit(UX(6:9)',STDX(6:9,4),1);
```

```
POLI5=polyfit(UX(6:9)',STDX(6:9,5),1);
```

```
%REGRESION
```

```
REGRES1=POLI1(1).*UX+POLI1(2);
```

```
REGRES2=POLI2(1).*UX+POLI2(2);
```

```
REGRES3=POLI3(1).*UX+POLI3(2);
```




```
REGRES4=POLI4(1).*UX(6:9)+POLI4(2);  
REGRES5=POLI5(1).*UX(6:9)+POLI5(2);
```

% DIFERENCIA DE PRESION MEDIA EN TODO EL LECHO. SE OBTIENE
MEDIANTE EXTRAPOLACION DE LA MEDIDA ENTRE DOS PUNTOS

```
PMEDL=5.6.*PMED(:,5);  
POLIL=polyfit(U(9:14)',PMEDL(9:14),1);  
REGRESL=POLIL(1).*U(9:14)+POLIL(2);  
% Calculo de la perdida de carga en el lecho  
DPL=M*g/A
```

```
figure(1);plot(U,PMEDL,'*',U,DPL,'-',U(9:14),REGRESL,'MarkerSize',6)  
xlabel('U (m/s)','FontSize',10)  
ylabel('PMEDLECHO(Pa)','FontSize',10)
```

```
figure(2);plot(UX,STDx(:,1),'*',UX,STDx(:,2),'+',UX,STDx(:,3),'o',UX,STDx(:,4),'d',  
UX,STDx(:,5),'x',UX,REGRES1,UX,REGRES2,UX,REGRES3,UX(6:9),REGRES4,U  
X(6:9),REGRES5,'MarkerSize',6)  
xlabel('U (m/s)','FontSize',10)  
ylabel('\sigma_p (Pa)','FontSize',10)
```

Umf=0.4

UX=UX/Umf

```
figure(3);plot(UX,STDx(:,1),'*',UX,STDx(:,2),'+',UX,STDx(:,3),'o',UX,STDx(:,4),'d',  
UX,STDx(:,5),'x',UX,REGRES1,UX,REGRES2,UX,REGRES3,UX(6:9),REGRES4,U  
X(6:9),REGRES5,'MarkerSize',6)  
xlabel('U (m/s)','FontSize',10)  
ylabel('\sigma_p (Pa)','FontSize',10)
```



VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN TEÓRICA

% VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN TEORICA

%Propiedades Aire

$\rho_{\text{hoa}}=1.2101$; %densidad del aire

$\mu_{\text{ua}}=1.796 \cdot 10^{-5}$; % viscosidad dinámica

%Propiedades Particulas

$\rho_{\text{hop}}=2651$; %densidad de partícula (kg/m³)

$d_p=700 \cdot 10^{-6}$; %diámetro de partícula (m)

$m_b=6.3$; % masa del lecho de partículas (kg)

$D=0.15$; %diámetro del lecho (m)

$L=1.5 \cdot D$; %altura de llenado del lecho fijo (m)

$V_{\text{ap}}=\pi \cdot (D^2) \cdot L/4$; % volumen aparente del lecho (m³)

$\rho_{\text{hob}}=m_b/V_{\text{ap}}$; %densidad aparente del lecho (kg/m³)

$\epsilon=1-(\rho_{\text{hob}}/\rho_{\text{hop}})$; %fracción de vacío del lecho fijo ()

$g=9.81$;

% Términos de la Ecuación (8.1)

$a=(1-\epsilon) \cdot (\rho_{\text{hop}}-\rho_{\text{hoa}}) \cdot g$;

$b=(150 \cdot ((1-\epsilon)^2) \cdot \mu_{\text{ua}})/((\epsilon^3) \cdot (d_p^2))$;

$c=(1.75 \cdot (1-\epsilon) \cdot \rho_{\text{hoa}})/((\epsilon^3) \cdot d_p)$;

% Velocidad de mínima fluidización (m/s)

$U=0$;

$e=1$; %error

$it=0$; %número de iteraciones

while $e > 10^{-7}$ & $it < 500$

$U_{\text{old}}=U$;

$U=a/(U_{\text{old}} \cdot c+b)$

$e=\max(\max(\text{abs}(U-U_{\text{old}})))$;

$it=it+1$

end



APLICACIÓN MODELO DAVIDSON

```
% APLICACION MODELO DAVIDSON
% Condiciones
Q=1200;
Pdif1_Pa=641.15;
% calculo de los parametros de la burbuja
s=0.05% separacion entre los dos puertos del sensor diferencial
g=9.81;% aceleracion de la gravedad
Nor=107;% Numero de orificios del distribuidor
D=0.15;% diametro del lecho
A=(pi*D^2)/4;% Seccion transversal del lecho
Ao=A/Nor;
U=(Q/60000)/A;
Umf=0.4; % m/s
z=0.1 % Altura del primer punto
% bubble diameter at a given height Darton et al. (1977)
db=[0.54.*(U-Umf).^0.4].*((z+4*sqrt(Ao))^0.8).*[g^(-0.2)]
db2=2.78*(U-Umf)^2/g % Para alta velocidad del gas
% bubble velocity [Davies and Taylor, 1950]
Ub=0.711.*(g.*db).^0.5
% calculo de la presion. Davidson model
rb=db./2;% radio de la burbuja
% El gradiente de presiones aguas arriba y aguas abajo, lejos de la burbuja es igual al correspondiente
J=-mean(Pdif1_Pa)/s;
% Discretizamos el eje y, que va de -0.1 a 0.1, en 100 puntos:
ymax=0.1;
ymin=-ymax;
deltay=(rb+ymax)*s*0.1;
% se define la presion en tres intervalos:
y1=[ymin:deltay:-rb];deltaP=J*rb^3*(y1./((E^2+y1.^2).^1.5));
y2=[-rb+deltay:deltay:rb];deltaP=[deltaP J.*y2];
y3=[rb+deltay:deltay:ymax];deltaP=[deltaP J*rb^3*(y3./((E^2+y3.^2).^1.5))];
y=[y1 y2 y3];
for i=1:(length(deltaP)-round(s/deltay));
dif1(i)=deltaP(round(i+s/deltay))-deltaP(i);
end
dif2(round(s/deltay+1):length(dif1))=dif1(1:length(dif1)-round(s/deltay+1)+1);
dif2(1:round(s/deltay)-1)=0;
figure(1);plot(y,deltaP,'b.',y+s,deltaP,'g.',y(1:length(deltaP)-round(s/deltay))+s,dif1,'r. ');
x=dif1;
DT=std(x)% Desviacion tipica de la fluctuacion de la presion diferencial
```

ANEXO 4: PLANOS ESTRUCTURALES DE LA INSTALACIÓN.